



**NAYARA
MIRANDA
BUCAIR**

**DETECÇÃO REMOTA PARA DISTINÇÃO DE
FITOPLÂNCTON NA COSTA PORTUGUESA**



**NAYARA
MIRANDA
BUCAIR**

DETECÇÃO REMOTA PARA DISTINÇÃO DE FITOPLÂNCTON NA COSTA PORTUGUESA

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e Zonas Costeiras, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Nogueira Brás de Oliveira, Investigador auxiliar do Instituto Português do Mar e da Atmosfera e Prof. Doutor Jesús Manuel Pedreira Dubert, Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Aos Meus Pais...

Por Todo Apoio E Confiança!

Mesmo quando tudo parece desabar,
Cabe a mim decidir entre rir ou chorar,
Ir ou ficar, desistir ou lutar;
Porque descobri, no caminho incerto da vida,
Que o mais importante é o decidir.

Cora Coralina

O júri

Presidente

Prof. Doutora Filomena M^a Cardoso Pedrosa Ferreira Martins
Professora associada da Universidade de Aveiro

Doutor Paulo Nogueira Brás de Oliveira
Investigador auxiliar do Instituto Português do Mar e Atmosfera - IPMA

Doutora Alexandra Maria Azinheira Duarte Silva
Investigadora pós doutoramento da Universidade de Lisboa

Agradecimentos

Ao prof. Jesús Dubert e ao Doutor Paulo Oliveira agradeço imensamente pela oportunidade de realização desse trabalho assim como por todo ensinamento, ajuda e apoio prestados. Agradeço toda a ajuda e paciência da Doutora Rita Nolasco, que sempre se mostrou muito disposta a me salvar das enrascadas computacionais.

Parte deste trabalho não seria possível sem o contributo dos pesquisadores Emmanuel Devred, Shubha Sathyendranath e Astrid Bracher, a quem agradeço imensamente pela ajuda e colaboração.

Os dados *in situ* utilizados para avaliar a qualidade dos resultados obtidos na Costa Portuguesa foram obtidos no âmbito do Projecto HAB-SPOT (PTDC/MAR/100348/2008).

Agradeço aos primeiros colegas de mestrado, em especial, Dora, Sofia, Susana, Filipe, Marta e Sidney, muito obrigada pela recepção e pela convivência durante esses anos.

Às amigas Fabíola Amorim, Ana Pires e Rosa Reboreda, não tenho como agradecer todo o apoio e a agitada programação cultural. Desde o mais simplório cafezinho até os jantares mais elaborados, contribuíram muito para que a minha estada em Portugal fosse muito mais agradável.

Aos amigos distantes, Jú, Kel, Bruno, Lumi, Cors, Catá e Helô, como não mencionar as hilárias BC's, meus queridos, muito obrigada por todo apoio e momentos de descontração (independente do fuso-horário).

Em especial gostaria de agradecer a minha família, por sempre acreditarem em mim, por toda confiança e pelo amor incondicional.

Muito Obrigada!

Palavras-chave

Deteção remota, cor do oceano, fitoplâncton, PFT.

Resumo

Estudos para identificação de grupos fitoplanctônicos através de detecção remota têm-se tornado cada vez mais importantes, principalmente, devido a participação desses organismos em ciclos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono e nitrogênio, que controlam o clima do nosso planeta. A discriminação dos grandes grupos pode ser inferida tanto em relação ao tamanho da célula do fitoplâncton (PSC - *Phytoplankton Size Class*), quanto pela função biogeoquímica que desempenham (PFT - *Phytoplankton Functional Type*). O objetivo do presente trabalho é avaliar a aplicabilidade de diferentes algoritmos na costa portuguesa, tendo em conta a temática de PFT. Serão apresentados, o método PhytoDOAS, PHYSAT e um algoritmo desenvolvido para identificação de diatomáceas. Os resultados obtidos foram relacionados com fatores físicos e ambientais da área de estudo e comparados com dados *in situ*. O método PhytoDOAS mostrou-se impróprio para aplicação à escala local (10 – 100 km), o método PHYSAT, exibiu resultados que elucidam satisfatoriamente a dominância de PFT em águas oceânicas e o algoritmo desenvolvido para identificação de diatomáceas revelou-se eficiente na detecção desses organismos junto a costa associados ao afloramento costeiro.

Keywords

Remote sensing, ocean color, phytoplankton, PFT.

Abstract

Studies to identify groups of phytoplankton by remote sensing have become increasingly important, especially due the role of these organisms in biogeochemical cycles such as the carbon cycle and nitrogen, which control the climate of our planet. The discrimination of main dominant groups can be inferred both in regarding to cell size of phytoplankton (PSC - Phytoplankton Size Class), as by their biogeochemistry function (PFT - Phytoplankton Functional Type). The objective of this study is to evaluate the applicability of different algorithms on the Portuguese coast, taking into account the theme of PFT. Will be presented, the method PhytoDOAS, PHYSAT and an algorithm developed for identify diatoms. The results were related to physical and environmental factors of the study area and compared with in situ data. The method PhytoDOAS proved unsuitable for application at local scales (10 – 100 km), the method PHYSAT, showed results that satisfactorily elucidate the dominance of PFT in offshore waters and the algorithm developed for identification of diatoms proved efficient in detecting these organisms along the coast associated with coastal upwelling.

Índice

Índice de Figuras	I
Índice de Tabelas.....	III
Glossário	IV
1. Introdução.....	1
1.1 Importância do Estudo.....	4
1.2 Motivação e Objetivos	8
2. Fundamentos Básicos de Sensoriamento Remoto	11
3. Fundamentação dos Algoritmos	17
3.1 Estado da Arte.....	18
3.1.1 Métodos baseados na concentração de clorofila e absorção:.....	18
3.1.2 Métodos que utilizam abordagem espectral:	19
☐ Anomalias de Reflectância:	19
☐ Métodos baseados em Absorção:.....	20
3.1.3 Método de Abordagem espectral com utilização de retroespalhamento de partículas (não considerando apenas fitoplâncton):.....	22
4. Metodologia	25
4.1 Metodologia PHYSAT	25
4.2 Metodologia para Distinção de Diatomáceas.....	29
4.3 Metodologia PhytoDOAS	33
5. Resultados.....	37
5.1 Metodologia PHYSAT	37
5.2 Metodologia para Distinção de Diatomáceas.....	43
5.3 Metodologia PhytoDOAS	47
6. Discussão e Conclusões.....	49
7. Considerações Finais	53
8. Referências Bibliográficas	55

Anexos

Índice de Figuras

Figura 1: Espectro electromagnético (Adaptado de Frank, 2005).	11
Figura 2: Definição de radiância: (a) campo de radiância em um ponto no espaço, (b) radiância em uma superfície, (c) Radiância da superfície. Fonte: Kirk (1994).....	13
Figura 3: Designação da L_u em função da radiação incidente. Fonte: Mobley (2010).....	13
Figura 4: Contribuição em percentagem do tamanho de células em função da concentração de Chla. Modificado de Brewin et al. (2010).....	17
Figura 5: Ilustração do efeito de primeira ordem devido a Chla. Nota-se fortes picos na gama do espectro azul e verde. Fonte: Alvain et al (2005).	26
Figura 6: Exemplo de aplicação da metodologia PHYSAT para imagens L3 do sensor SeaWiFS de 17.Ago.2002, disponibilizado pelo <i>Laboratoire d’Océanologie et de Géosciences</i> (LOG). A cor azul corresponde ao grupo das Haptophytas, vermelho às diatomáceas, verde os <i>Prochlorococcus</i> e amarelo ao <i>Synechococcus</i> -como cianobactérias.	37
Figura 7: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em imagem L3 do sensor SeaWiFS de 17.Ago.2002. A cor azul corresponde ao grupo das Haptophytas, vermelho às diatomáceas, verde os <i>Prochlorococcus</i> e amarelo as <i>Synechococcus</i> -como cianobactérias.	38
Figura 8: Resultado da aplicação da metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L3 do sensor SeaWiFS do dia 29.Ago.2010. À esquerda, representação da concentração de Chla e à direita os grupos de fitoplâncton dominante.	39
Figura 9: Resultado da aplicação da metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L2 do sensor SeaWiFS do dia 29.Ago.2010. À esquerda, representação da concentração de Chla e à direita os grupos de fitoplâncton dominante.	40
Figura 10: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L3 do sensor MODIS-Aqua do dia 29.Ago.2010. Ilustrando a concentração de Chla (esquerda) e os grupos de fitoplâncton dominantes (direita).	41
Figura 11: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L2 do sensor MODIS-Aqua do dia 29.Ago.2010. Ilustrando a concentração de Chla (esquerda) e os grupos de fitoplâncton dominantes (direita).	41
Figura 12: Ilustração da reflectância obtida em Rrs_{412} (a) e TSM (b) para o dia 29.Ago.2010.	42

Figura 13: Resultado do PHYSAT para imagem L2 do sensor MODIS-Aqua para o dia 13.Set.2011. Elucidação da evolução ecológica da comunidade fitoplanctônica em período de <i>upwelling</i>	43
Figura 14: Resultado comparativo da aplicação de 2 <i>look-up tables</i> , uma com base em dados do Atlântico noroeste (a) e outra do Pacífico sudeste (b). Aplicação em imagem L2 do sensor SeaWiFS de 29 de Agosto de 2010.....	44
Figura 15: Resultado de contagem de células de diatomáceas para o cruzeiro de verão de 2010.	45
Figura 16: Ilustração da reflectância obtida nas diferentes bandas espectrais do sensor SeaWiFS (29.Ago.2010).	45
Figura 17: Resultado da identificação de diatomáceas (a) na costa portuguesa (em vermelho as diatomáceas e em rosa a população mista) em comparação as imagens de reflectância no canal de 531nm (b) e concentração de Chla (c) do sensor MODIS-Aqua do dia 14.Set.2011.	46
Figura 18: Resultado de contagem de células de diatomáceas para o cruzeiro de verão de 2011.	47
Figura 19: Resultado do método PhytoDOAS para identificação de diatomáceas na costa portuguesa, média mensal de Setembro de 2010.	48

Índice de Tabelas

Tabela 1: Limiar relativo ao inventário de pigmentos para distinção dos grupos fitoplanctônicos, segundo Alvain et al. (2005).....	27
Tabela 2: Relação de pigmentos acessórios como biomarcadores de PFTs. Adaptado de Alvain et al. (2005).	28
Tabela 3: Critério estabelecido por Alvain et al. (2008) para diferenciação de PFT, baseado no espectro de nLw^*	29

Glossário

Sigla / Símbolo	Descrição
A	Área
a	Coeficiente de absorção (dimensão L^{-1})
a_w	Coeficiente de absorção da água pura
a_y	Coeficiente de absorção de substâncias amarelas
a_p	Coeficiente de absorção do fitoplâncton
AOP	Propriedades ópticas aparente (<i>Apparent Optical Property</i>)
b	Coeficiente de espalhamento (dimensão L^{-1}) (<i>Scattering coefficient</i>)
b_b	Coeficiente de retroespalhamento (<i>backscattering coefficient</i>)
Chla	Clorofila-a
CDM	Matéria detritica colorida (<i>coloured detrital matter</i>)
CDOM	Matéria orgânica dissolvida colorida (<i>Colored Dissolved Organic Matter</i>)
CZCS	Sensor <i>Coastal Zone Color Scanner</i>
Div a	Pigmento: divinil clorofila-a
DMS	Composto químico: dimetilo de enxofre/sulfureto dimetilo (<i>Dimethyl Sulphide</i>)
DOAS	Método de análise por 'espectroscopia de absorção óptica diferencial' (<i>Differential Optical Absorption Spectroscopy</i>)
E	Irradiância
E_d	Irradiância descendente (<i>Downwelling Irradiance</i>)
E_s	Fluxo solar extraterrestre
E_u	Irradiância Ascendente (<i>upwelling Irradiance</i>)
Fucox	Pigmento: Fucoxantina
HAB	Blooms de algas tóxicas (<i>Harmful Algal Blooms</i>)
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (<i>High Performance/Pressure Liquid Chromatography</i>)
I	Intensidade Radiante ($W\ sr^{-1}$)
IOP	Propriedades Ópticas inerentes (<i>Inherent Optical Properties</i>)
Kd	Coeficiente de atenuação difusa
L	Radiância ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$)

L_u	Radiância ascendente (<i>upwelling radiance</i>)
L_w	Radiância ascendente emitida da superfície do oceano/Radiância emitida (<i>Water leaving radiance</i>)
LOG	Centro de Investigação: <i>Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences</i>
LUT	Tabelas de referência (<i>Look-up-table</i>)
nL_w	Radiância emitida normalizada (<i>Normalized water leaving radiance</i>)
nL_w^*	Radiância emitida específica/anomalia da reflectância (<i>Specific water leaving radiance</i>)
nL_w^{ref}	Radiância emitida de referência
M	Exitância ou Emitância
Perid	Pigmento: Peridinina
PFT	<i>Phytoplankton Functional type</i>
Phaeo a	Pigmento: <i>phaeophytin a</i>
PSC	<i>Phytoplankton Size Class</i>
R^R	Espalhamento Raman (<i>Raman scattering</i>)
REM	Radiação eletromagnética
Rrs	Reflectância do sensoriamento remoto (sr^{-1})
SeaDAS	Software: <i>SeaWiFS Data Analysis System</i> , para visualização e processamentos de imagens de satélite
SLC	Synechococcus-como cianobactérias (<i>Synechococcus-like cyanobacteria</i>)
sr	Unidade: steradian
TSM	Temperatura Superficial do Mar
VRS	Espalhamento Raman vibratório (<i>Vibrational Raman Scattering</i>)
$VSF, \beta(\theta)$	Função do espalhamento volumétrico (<i>Volume scattering function</i>)
w	Ângulo Sólido (sr^{-1})
Z	Profundidade (m)
Zeax	Pigmento: Zeaxantina
19'HF	Pigmento: <i>19'Hexanoyloxyfucoxanthin</i>
λ	Comprimento de onda (nm)
φ	Ângulo azemutal
θ	Ângulo zenital
ϕ	Fluxo radiante total
δ	Profundidade de penetração da luz

1. Introdução

A oceanografia convencional se vale de coletas *in situ* no oceano, a partir das quais se obtêm dados essencialmente por meio de instrumentos mecânicos ou eletrônicos, lançados a partir de plataformas flutuantes com mobilidade reduzida, o que dificulta a coleta de dados em grandes áreas de uma forma sinóptica (Souza, 2008). A fim de reduzir esta limitação iniciou-se a utilização de imagens de satélites para monitorização e estudos dos oceanos, as quais possibilitam a cobertura de uma área maior em um intervalo de tempo menor. Dentre as vantagens dessa ciência pode-se citar a visão sinóptica bidimensional, a alta resolução espacial e temporal dos dados e a capacidade de se construir séries de dados com consistência espacial por longos períodos de tempo (Robinson, 1985).

A obtenção metódica e contínua de dados é uma das maiores razões do sucesso da oceanografia por satélites. No entanto há que ressaltar os problemas que afetam os dados obtidos por essa técnica, como interferência atmosférica, condições meteorológicas locais adversas (como presença de núvens) e a necessidade de calibração e validação dos dados coletados, pois os dados de satélite, por serem medições indiretas, estão sujeitos a erros e correções de calibração que dependem da disponibilidade e precisão de dados *in situ*.

Segundo Kampel (2002) para quaisquer variações que ocorram em profundidades nos oceanos, são os parâmetros superficiais - temperatura, velocidades, concentrações salinas, de gases dissolvidos etc. - que controlam as interações de energia/matéria entre o oceano e a atmosfera. Desta forma, apesar da coleta de dados via sensoriamento remoto fornecer informação sobre a camada superficial dos oceanos, trata-se de uma camada muito importante.

Fenômenos oceanográficos de mesoescala, como vórtices, meandros e ressurgências contribuem para o aumento da produtividade primária da região, acarretando portanto, o aumento da biomassa. Tais fenômenos podem ser detectados através de imagens de satélites, muitas das quais são livremente disponibilizadas na internet.

De acordo com Robinson (2004), a maior parte dos parâmetros marinhos passíveis de serem coletados remotamente podem ser agrupados em quatro grupos relacionados com a: cor, temperatura, rugosidade e altura da superfície livre do oceano.

Neste trabalho levaremos em conta a cor do oceano, que consiste na faixa de frequência visível do espectro de energia eletromagnética proveniente do sol que atravessa a atmosfera, interage com a camada superficial dos oceanos e retorna, atravessando novamente a atmosfera para então ser captada pelo sensor (Menezes, 2001).

Nos últimos anos, as imagens de satélite da cor do oceano têm sido utilizadas para construir mapas de concentração de clorofila-a (Chla). Devido a presença deste pigmento nas células de praticamente todos os grupos fitoplanctônicos é possível estimar a abundância de fitoplâncton em águas superficiais.

O fitoplâncton pode ser definido como o conjunto de microorganismos fotossintetizantes, habitantes da zona fótica, não possuindo grande mobilidade própria, estando a mercê do sistema de correntes e regime de marés, sendo o seu movimento restrito à migração vertical de alguns metros por dia.

Tais organismos compõem a base da cadeia trófica dos oceanos e a importância de quantificar as mudanças em relação à sua abundância no tempo e no espaço consiste no fato de que estes afetam ciclos biogeoquímicos, como os ciclos de carbono, nitrogênio e outros elementos que controlam o clima do nosso planeta. De acordo com Campbell et al. (2002) um produto secundário das estimativas de abundância do fitoplâncton é a estimativa de produção primária nos ecossistemas aquáticos.

Nas estimativas feitas a partir de dados de satélite, a produção primária é geralmente expressa como função da biomassa de fitoplâncton e da irradiância disponível. A biomassa fitoplanctônica na camada superficial é determinada pela concentração de Chla obtida por imagens da cor do oceano.

Séries temporais das estimativas de concentração de Chla têm sido amplamente utilizadas para descrever as interações entre processos físicos e biológicos nos oceanos. As aplicações incluem estimativas de visibilidade, armazenamento e transporte de calor, detecção de zonas potenciais de pesca, estudos da interação oceano/atmosfera, inferência de correntes oceânicas superficiais e detecção de *blooms* fitoplanctônicos (Brewin et al., 2011a; Ciotti, 2008).

A cor do oceano refere-se à assinatura espectral da água na faixa do visível (Souza, 2003), que depende principalmente da absorção e espalhamento (difusão) dos diferentes comprimentos de onda na água. Essas propriedades são estabelecidas através dos coeficientes de espalhamento, coeficientes de absorção e da função de espalhamento de volume que relaciona o espalhamento à geometria da radiação. Essas propriedades são conhecidas como “propriedades ópticas inerentes” da água (Kirk, 1994). A cor do mar também depende de outras propriedades do oceano que são influenciadas pela distribuição angular do campo de luz ou geometria da radiação eletromagnética, assim como pela natureza e quantidade de substâncias presentes na água. Essas propriedades, conhecidas como “propriedades ópticas aparentes” (Kirk, 1994), incluem o

coeficiente de atenuação da radiação (radiância ou irradiância) na coluna de água (K_d). Esse coeficiente representa uma taxa de variação logarítmica entre a radiação e a profundidade e é amplamente usado em modelos de penetração de luz nos oceanos (Souza, 2003).

Os componentes opticamente ativos da água que interagem com a radiação eletromagnética através dos processos de absorção e espalhamento, são classificados em 3 categorias distintas: matéria orgânica dissolvida (substâncias amarelas), partículas em suspensão e pigmentos fotossintéticos (Menezes, 2001).

O material em suspensão pode ser de origem inorgânica (constituído principalmente por detritos de origem sedimentar) ou de origem biológica, sendo o mais importante o fitoplâncton marinho. Apesar dos organismos microscópicos poderem ser considerados material em suspensão, este termo refere-se a substâncias de natureza inorgânica, uma vez que possuem índice de refração muitas vezes maior que as substâncias orgânicas (Souza, 2008). O fitoplâncton constitui um grupo particular, visto que os pigmentos fotossintéticos são responsáveis por absorver luz, principalmente na faixa do azul e vermelho no espectro do visível (Menezes, 2001).

Do ponto de vista ecológico, de entre os componentes opticamente ativos, o fitoplâncton tem grande importância nos oceanos, sendo a base de toda a cadeia trófica e indicador de eutrofização do meio.

Existe uma correlação muito forte entre a temperatura superficial do mar (TSM) e a concentração de fitoplâncton, sendo as águas frias mais produtivas e as mais quentes oligotróficas. Em geral, independente da temperatura, as águas costeiras abastecidas pelo aporte continental de nutrientes são muito mais produtivas do que as águas oceânicas (Souza, 2003).

Mapas de distribuição de Chla na superfície do mar começaram a ser produzidos na década de 1970 com dados do sensor CZCS, tais mapas são extremamente úteis para estudar a produção primária, para estudos climáticos e ambientais, assim como para estabelecer a relação entre a abundância de organismos e fenômenos físicos que ocorrem no oceano (Souza, 2003).

A Chla é um pigmento presente nas células do fitoplâncton e possui um comportamento espectral bem definido: um pico de absorção na faixa do azul e uma região de baixa absorção na faixa do verde. No entanto podem ocorrer alguns desvios nessa relação decorrentes de efeitos de outras substâncias opticamente ativas, como matéria orgânica dissolvida e sedimento em suspensão, ou podem ser resultado da presença de diferentes espécies de fitoplâncton no ambiente (Ciotti, 2008).

Nos últimos anos, é crescente o número de trabalhos que visam identificar a comunidade fitoplanctônica através de imagens de satélite. Trata-se de um tema complexo pois a comunidade de fitoplâncton inclui espécies de diferentes tamanhos, estrutura internas e externas, forma e composição pigmentar. Todas essas características influenciam a interação destes com a luz em algum grau de relevância, muitos fatores devem ser considerados para descrever completamente as propriedades ópticas de diferentes comunidades fitoplanctônicas (Ciotti et al., 2002).

Nas últimas décadas foram elaboradas duas abordagens para inferência da dominância desses organismos na camada superficial dos oceanos, uma difere a comunidade fitoplanctônica em função do tamanho da célula - PSC (*Phytoplankton Size Class*), a outra vertente baseia-se nas funções biogeoquímicas exercidas pelas espécies – PFT (*Phytoplankton Functional Type*). A opção do modelo de agrupamento a ser escolhido depende do estudo que se pretende realizar.

Geralmente existe uma boa concordância entre tamanho da célula e grupo funcional, por exemplo, *Prochlorococcus sp.*, pertencem a classe de tamanho de picofitoplâncton (<2µm) e a maioria das diatomáceas e dinoflagelados são classificados como microfitoplâncton (Devred et al., 2011), no entanto essa concordância nem sempre se verifica, ficando restrita a classificação dos grupos funcionais às funções biogeoquímicas que determinado grupo desempenha, como fixação de nitrogênio, calcificação, silificação e produção de DMS (dimetilsulfureto/dimetilo de enxofre/sulfureto de dimetilo/sulfeto dimetila), não necessariamente havendo uma filogenia comum.

No presente trabalho, a temática da diferenciação de grupos fitoplanctônicos através de imagens de satélite será abordado, enfatizando a perspectiva de PFT, os algoritmos existentes e a aplicabilidade destes na costa oeste da Península Ibérica, associando a distribuição espacial dos grupos com as condições oceanográficas da região.

1.1 Importância do Estudo

No princípio, o principal objetivo das missões de satélites com suporte radiométricos de espectro visível era criar um campo sinóptico de biomassa fitoplanctônica indexada à concentração de Chla. No contexto de mudanças climáticas, a maior aplicação tem sido os resultados de modelação de produtividade primária e o ciclo do carbono nos oceanos (Nair et al., 2008).

Hirata et al. (2008) salienta que a concentração de Chla é a variável biológica mais importante operacionalmente derivada dos sensores, mas que no entanto, a inferência de outras variáveis biológicas (i.e. composição pigmentar) ou outras interpretações (i.e. táxon ou espécies de fitoplâncton) podem fornecer dados para o melhoramento de modelos ambientais.

Mudanças na composição da comunidade fitoplanctônica é uma característica essencial na dinâmica dos ecossistemas marinhos. A descrição e previsão dessas mudanças são metas importantes para muitas áreas da oceanografia (Ciotti et al., 2002).

O interesse em identificar os grupos funcionais de fitoplânctons usando dados de sensoriamento remoto têm crescido na última década. A aplicação de PFTs inclui modelos computacionais de produção primária, modelos biogeoquímicos, detecção de *blooms* de algas tóxicas e monitoramento da 'saúde' do ambiente aquático (Devred et al., 2011).

Os diversos grupos fitoplanctônicos existentes diferem bastante em respeito às suas funções biogeoquímicas, e desta forma são agrupados de acordo com o papel que desempenham no ambiente e a participação em ciclos biogeoquímicos que controlam o clima do planeta.

Algumas espécies de fitoplâncton utilizam o nitrogênio atmosférico como matéria-prima para seu crescimento, o que causa impacto no ciclo do nitrogênio e pode influenciar mudanças climáticas. As cianobactérias são as principais responsáveis para este efeito, sendo o *Trichodesmium* o grupo dominante em águas oligotróficas.

Organismos como os coccolitoforídeos caracterizam-se por apresentar placas externas composta por carbonato de cálcio. A formação dessas placas reduz a concentração de carbonatos no ambiente, diminuindo a alcalinidade da água. Porém o processo de calcificação libera dióxido de carbono nas camadas superiores da coluna de água o que vem a ser uma potente fonte para a atmosfera.

Espécies de diatomáceas incorporam a sílica para formação de sua parede celular (frústula), o que aumenta sua densidade e acarreta maior rapidez no afundamento da célula, contribuindo para a exportação de carbono. Esses organismos são encontrados principalmente em águas ricas em nutrientes, contribuindo com cerca de 40% da produtividade primária total dos oceanos (Nair et al., 2008), sendo caracterizado por ser o organismo dominante em *blooms* de primavera/verão em regiões temperadas e polares (Alvain et al., 2008; Nair et al., 2008; Sathyendranath et al., 2004).

A emissão de DMS, é a principal fonte natural para a redução de enxofre na atmosfera. O DMS forma aerossóis de sulfato, que mantem o balanço da radiação global, pois funcionam como núcleo de condensação de nuvens e retroespalham a radiação solar auxiliando a arrefecimento da Terra (Nair et al., 2008). Alguns grupos fitoplanctônicos produtores de DMS são dinophyceae, haptophyceae, chrysophyceae, pelagophyceae e prasinophyceae, sendo portanto os grandes responsáveis, os grupos de dinoflagelados e haptophytas (Sunda et al., 2002).

O dióxido de carbono lançado na atmosfera devido à queima de combustíveis fósseis ou desflorestamento, pode ser absorvido pelo ecossistema terrestre, aquático ou permanecer na atmosfera, caso este último ocorra, sobrevém uma intensificação no processo de efeito estufa, extremamente prejudicial ao nosso planeta.

Os oceanos desempenham papel de extrema importância no ciclo do carbono planetário. Cerca de 26% do dióxido de carbono lançado na atmosfera é absorvido pelos oceanos (House et al., 2002; Le Quéré, 2005; Nair et al., 2008), ou melhor, é incorporado pelo fitoplâncton marinho, sendo as diatomáceas responsáveis por 20% da fixação global de carbono (Brewin et al., 2011b; Nelson et al., 1995).

Além da explícita importância de se conhecer os grupos fitoplanctônicos presentes na água em função dos ciclos biogeoquímicos que interferem no clima e saúde do nosso planeta, o reconhecimento desses grupos contribui para a calibração e validação de modelos matemáticos biogeoquímicos, os quais por sua vez se tornam muito mais robustos e permitem que alterações ecológicas sejam consideradas, melhorando o diagnóstico e previsões futuras.

Devido a necessidade urgente de aferir a percepção sobre os fatores ambientais que controlam o ambiente marinho e de apresentar a natural complexidade baseado em entendimentos teóricos, Le Quéré (2005) elaborou um protótipo delineado como um DGOM (*Dynamic Green Ocean Model*) com base em 10 PFT com o propósito de investigar processos biogeoquímicos no oceano. O trabalho focou-se em identificar as espécies que desempenham importante papel em processos biogeoquímicos, nos processos de crescimento e mortalidade desses grupos, assim como a interação entre eles e as parametrizações desses processos no âmbito de modelagem numérica, ressaltando a importância e influência do conhecimento dos grupos fitoplanctônicos.

O fitoplâncton é quem faz a conexão entre energia solar e a produção de recursos biológicos, dos quais dependem todos os outros níveis tróficos existentes. Todavia, espécies de zooplâncton e peixes podem ter preferências e uma alimentação selectiva para diferentes

tamanhos e espécies de fitoplâncton (Brewin et al., 2012; Hansen et al., 1994; Jennings et al., 2002; Scharf et al., 2000). Esse tópico ressalta as implicações comerciais e gerenciais dos recursos marinhos (Souza, 2008) e a importância de se conhecer a estrutura da comunidade fitoplanctônica local.

Aprimorando-se o entendimento na estrutura espacial das diferentes comunidades de fitoplâncton, avanços na temática biogeoquímica e de cadeia alimentar podem ser efetuadas, o que aumenta nossa compreensão das necessidades do sistema e de prever mudanças futuras. Métodos que podem quantificar e identificar diferentes elementos da comunidade de fitoplâncton podem prover informações úteis para auxiliar no entendimento de processos ecológicos e biogeoquímico (Brewin et al., 2011a). Portanto a estrutura das comunidades do fitoplâncton é uma característica importante a ser conhecida para estudar as variações de estoques pesqueiros e ciclo do carbono em detalhe (Ciotti, 2008).

Outra importância muito relevante que compete ao âmbito de saúde pública, economia e turismo, consiste na identificação de espécies de fitoplâncton que são capazes de produzir substâncias tóxicas. As quais podem causar sintomas como paralisia e amnésia quando ingerido, provocar contaminação de praias turísticas e ocasionar prejuízos à pesca e aquicultura.

Blooms de algas tóxicas – HABs (*Harmful algal Blooms*), consiste em um fenômeno de rápido aumento ou acumulação de biomassa de organismos capazes de produzir toxinas em ecossistemas aquáticos (Shen et al., 2012). Quando o *bloom* produz uma coloração diferente na água é denominado de ‘Maré Vermelha’ (Moita, 2001). E o aparente aumento mundial deste fenômeno nos últimos anos vem chamado atenção de autoridades públicas, mídia e da sociedade em geral.

A discriminação e identificação de HABs por imagens de satélite beneficiará a capacidade de sistemas de alerta precoce e de estudos dos fatores ambientais que afetam a inicialização dos *blooms* (Miller et al., 2006).

Na costa portuguesa, em grande parte dos casos, os HABs estão associados a ocorrência de espécies de dinoflagelados, que apesar de apresentarem comportamento espectral semelhante ao das diatomáceas, diferem muito no comportamento ecológico. As diatomáceas (R – estrategista) são geralmente encontradas em regiões onde a coluna de água é homogênea (misturada), com elevada concentração de nutrientes, são tolerantes a turbulência e são comumente associadas a fenômenos de afloramento costeiro, principalmente no período de primavera/verão na costa portuguesa, já as espécies de dinoflagelados (K – estrategista) são

encontrados em regiões mais estáveis, com ausência de ventos fortes, coluna d'água estratificada e baixa concentração de nutrientes (Moita, 2001; Silva et al., 2009). Dessa forma, dificilmente, os dois grupos coexistem em simultâneo.

Margalef (1978) e Cullen et al. (2002) afirmam que o ambiente físico (turbulência, disponibilidade de luz e nutrientes) controla amplamente a distribuição das células.

Algumas espécies de fitoplâncton, devido às suas propriedades ópticas específicas, podem ser detectadas directamente do espaço, como *blooms* da cianobactéria *Trichodesmium*, que produzem, nas águas superficiais, uma coloração amarela dourada (Nair et al., 2008) ou por vezes amarelo esverdeado (Subramaniam et al., 2002) e estão associadas à produção de matéria orgânica dissolvida (CDOM). *Blooms* de coccolitoforídeos também são facilmente identificados, pois produzem coloração turquesa leitosa nas imagens de cor real do oceano (Alvain et al., 2008; Brown & Podestdt, 1997; Nair et al., 2008). No entanto, as demais espécies não são tão facilmente identificáveis, sendo preciso a elaboração de modelos matemáticos e análises espectrais para distinção e identificação dos grupos.

1.2 Motivação e Objetivos

Comparativamente com o ambiente terrestre, pouco se sabe sobre os oceanos, motivo este que acaba por despertar em alguns de nós uma certa curiosidade, uma vontade de descobrir e explorar o desconhecido. No entanto, o estudo dos oceanos, por vezes, pode ser dispendioso, necessita-se de mão-de-obra especializada, embarcações, equipamentos sofisticados e que suportem as avarias impostas pelo ambiente. E para além disso, existe a limitação de se realizar, em um instante apenas uma amostragem local. A oceanografia por satélite veio a sanar essa limitação, permitindo aos pesquisadores 'amostrar' grandes áreas em simultâneo. São crescentes os esforços para o aprimoramento de técnicas nesta área de conhecimento, inicialmente, priorizou-se análise de temperatura e inferências sobre a cor dos oceanos, com o passar dos anos, passou-se a monitorar as fenómenos de meso e grande escala, correntes, altura no nível do mar, ondas, concentrações de pigmentos, aplicações para gerenciamento de áreas alagáveis e monitoramento de estoques pesqueiros. Atualmente é possível inferir valores de salinidade e identificar os possíveis organismos existente em uma dada área através de dados satelitais.

Se conseguirmos identificar os organismos primários existentes nos corpos de água, seria possível aprimorar as técnicas para estudo e monitoramento dos mesmos, extrapolar as

informações para os níveis tróficos subsequentes e aperfeiçoar as inferências entre as trocas oceano-atmosfera, visto que estes organismos desempenham importante papel nos ciclos biogeoquímicos.

O objetivo do presente trabalho consiste, inicialmente, em um levantamento bibliográfico sobre a distinção de grupos fitoplanctônicos através de imagens de satélite, seguindo de objetivos específicos que abrangem a aplicabilidade de algoritmos existentes na costa portuguesa.

2. Fundamentos Básicos de Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto da cor da água é realizado com uso de sistema de sensores passivos com campo de visão estreito, capaz de monitorar o fluxo radiométrico que chega em seus detectores em diferentes comprimentos de onda, nas faixas do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Kampel & Novo, 2008). Os principais sensores destinados a monitoramento da cor do oceano e suas características correspondentes estão relacionados no Anexo 1.

Para um melhor entendimento da aplicação da técnica de detecção remota à cor do oceano, faz-se necessário a introdução de alguns princípios básicos.

O sensoriamento remoto consiste em um conjunto de técnicas destinado a obtenção de informações com ausência de contato direto. Para tal, é necessário que haja uma fonte de emissão de radiação eletromagnética (REM), o alvo de estudo e o sensor, instrumento capaz de coletar a REM refletida/emitida pelo alvo. k

A REM pode propagar-se de acordo com modelo quântico ou ondulatório. Sob a perspectiva do modelo ondulatório, entre oscilações dos campos elétricos e magnéticos, a REM propaga-se na forma de onda, e o comprimento de onda (λ) representa a distância entre dois ponto de igual campo elétrico e magnético. O conjunto de comprimentos de onda que compõem a REM é denominado espectro eletromagnético, o qual é dividido em diversas regiões/bandas/faixas espectrais (Figura 1).

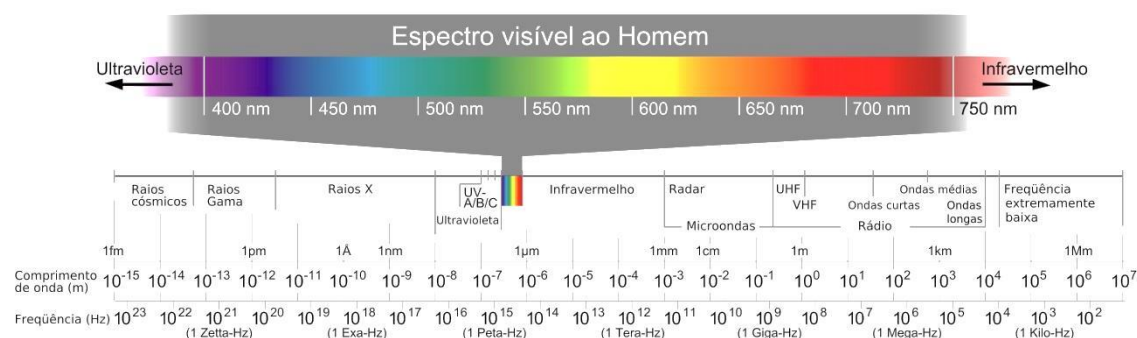


Figura 1: Espectro electromagnético (Adaptado de Frank, 2005).

A *Energia Radiante* de uma fonte de luz é a soma de toda energia luminosa radiada da fonte para todas as direcções e o *Fluxo Radiante* para esta fonte consiste na taxa de fluxo da

energia a partir da fonte (i.e. energia por unidade de tempo). E a *Densidade de Fluxo Radiante*, comumente utilizado em sensoriamento remoto, representa o fluxo de energia interceptado por unidade de área de uma dada superfície. Assim para, *Fluxo Total* (ϕ) obtido para uma área de superfície A , a média da densidade de fluxo radiante é: $E=\phi/A$, onde E é utilizado para denotar o fluxo de energia que chega à superfície, também denominada *Irradiância* (Robinson, 2004). A principal fonte de energia radiante da Terra é o sol, sendo portanto o termo anterior definido como *Irradiância Solar*.

Irradiância (E) pode ser definido como fluxo radiante por unidade de área de superfície. A interceptação de um feixe de fótons por uma superfície plana irá produzir irradiância proporcional ao co-seno do ângulo incidente. O chamado ‘co-seno colector’ é usado para medir a irradiância descendente e ascendente que induz uma resposta de detecção proporcional ao $\cos\theta$, assim ponderando a contribuição de cada fóton de acordo com o co-seno do ângulo incidente, θ (IOCCG, 2011).

Tanto no meio marinho quanto atmosférico é útil quantificar a quantidade de densidade de fluxo radiante que é transmitido de um meio para outro em determinada profundidade abaixo ou na superfície (plano horizontal). No entanto é preciso diferenciar essa transmissão de energia: quando fluxo de energia passa para a parte inferior da coluna de água, define-se como *Irradiância descendente* (E_d – *Downwelling Irradiance*); enquanto o que foi retroespalhado das camadas inferiores e desloca-se em direção a superfície é considerada *Irradiância Ascendente* (E_u – *Upwelling Irradiance*).

Robinson (2004, 1985) define *Exitância ou Emitância* (M) como fluxo de energia emitido pela superfície, sendo que E e M , no geral não especificam a direção da radiação, visto que esses parâmetros integram o fluxo total incidente na superfície de todas as direções capazes de atingir tal superfície.

Os sensores satelitais possuem uma abertura pela qual a REM refletida ou emitida pelos objetos é coletada pelo chamado “detector”, tal abertura possui dimensões variáveis e dependentes das características tecnológicas do instrumento. Contudo, o feixe que se forma entre a abertura e o ponto da superfície do objeto passa a ser definido um cone por onde a REM é transmitida. Esse cone é denominado de *Ângulo Sólido* - w (com unidade adimensional *steradian* - sr), e somente a REM contida no ângulo sólido será detectada. Portanto, o sensor não observa somente um ponto na superfície e sim uma determinada área, ou seja, o que é realmente medido pelo sensor é a *Intensidade Radiante* (I) de todos os fluxos contidos no ângulo, que nada mais é

do que o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido (com unidades de *Watts* por steradian) $I = d\phi/d\omega$.

Quando considerado o fluxo radiante não apenas em função do ângulo sólido mas também por unidade de área (A) do plano em determinados ângulos na direção do fluxo, chega-se ao conceito mais utilizado de *Radiância* (L) (Kirk, 1994). Em outras palavras, é o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido em uma dada direção, por unidade de área da fonte projetada na mesma direção (Robinson, 2004). É considerada espectralmente dependente e possui unidade de $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$ (IOCCG, 2011).

$$L(\theta, \phi, z, \lambda) = \frac{d^2\phi}{d\omega\ dA} \quad \text{ou} \quad L(\theta, \phi, z, \lambda) = \frac{d^2\phi}{d\omega\ dS\cos\theta}$$

Onde, $dA = dS\cos\theta$, é a área projetada do elemento da superfície dS , visto da direção da propagação, definido pelo ângulo zenite (θ) e ângulo azimutal (ϕ), o detalhamento da definição pode ser observado na figura 2.

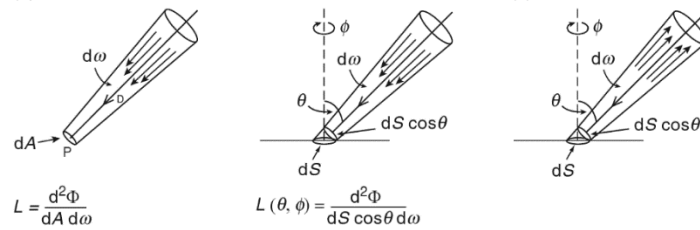


Figura 2: Definição de radiância: (a) campo de radiância em um ponto no espaço, (b) radiância em uma superfície, (c) Radiância da superfície. Fonte: Kirk (1994).

A *Radiância Ascendente* (L_u), classicamente medida através de perfis de radiômetros subaquáticos, é a radiância que desponta verticalmente para cima ou no ângulo ‘nadir’ (IOCCG, 2011). A L_u é a soma da *Water Leaving Radiance* (L_w), que não é medida diretamente, e da radiação solar e atmosférica refletida pela superfície (L_r) (Figura 3).

$$L_u(\text{in air}, \theta, \phi, \lambda) = L_w(\theta, \phi, \lambda) + L_r(\theta, \phi, \lambda)$$

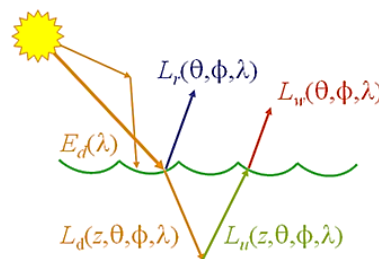


Figura 3: Designação da L_u em função da radiação incidente. Fonte: Mobley (2010)

A *Water Leaving Radiance* (L_w) é a radiância que emerge do oceano no ângulo nadir e é quantificado logo acima da superfície, levando em consideração a refração e reflexão na interface (IOCCG, 2011). Mas a L_w enquanto derivada de um sensor da cor do oceano e depois de inferida a correção atmosférica, é oriunda de um ângulo e azimuth definido pela posição e ângulo de visão do sensor, e não pelo nadir. Portanto, para validar a L_w medida pelo sensor é preciso compará-la com medições *in situ*, para tal é aplicado um processo de normalização em ambas radiâncias, isso conduz a uma derivação denominada *normalized water leaving radiance* (nL_w), que possui o objetivo de remover os efeitos das condições de iluminação (zenite solar, transmitância atmosférica), sendo este o produto padrão da detecção remota (IOCCG, 2011).

$$nL_w = L_w \frac{E_s}{E_d}$$

Onde E_s é a constante de fluxo solar extraterrestre ($\approx 168 \text{ W.m}^{-2}$; com média da distância Terra-Sol).

O parâmetro remanescente que provê informações sobre a estrutura angular do domínio da luz é a *Reflectância*, por vezes chamado de razão de irradiância, com unidade adimensional, é definida como sendo a razão entre a irradiância ascendente (fluxo por unidade de área) e a irradiância descendente em mesma profundidade e comprimento de onda:

$$R(\lambda, z) = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)}$$

A *Reflectância* representa relação entre a *Radiância* refletida de um dado objeto pela *Irradiância*. Nota-se portanto que a *Reflectância* expressa as propriedades intrínsecas dos objetos em refletir a REM sobre eles incidente, que dependente das propriedades físico-químicas do alvo.

Para o caso especial de sensoriamento remoto é conveniente utilizar a razão entre a *Water Leaving Radiance* (L_w) ascendente na direção do sensor e a Irradiância descendente (E_d). Esta variável é designada como reflectância do sensoriamento remoto R_{rs} (Robinson, 2004), em unidade por sr^{-1} (IOCCG, 2011) e é definido como:

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d}$$

Essa razão indica a proporção de luz incidente sobre a superfície do mar que é eventualmente espalhada de volta ao sensor na direção nadir. É definida pelo ângulo de visão e posição do sensor e é também considerada uma propriedade óptica aparente (IOCCG, 2011).

Outro parâmetro relevante é o *coeficiente de atenuação difusa* (K_d) que quantifica o decaimento exponencial da irradiância de acordo com a profundidade da coluna de água (IOCCG 11). O k_d para irradiância e radiância são '*Propriedades Ópticas Aparentes*' (AOP), são influenciadas pela distribuição angular do campo de luz, assim como pela natureza e quantidade de substâncias presentes no meio (Kampel & Novo, 2008).

Já as *Propriedades Ópticas Inerentes* (IOP) são independentes de variações na distribuição angular do campo de luz incidente, sendo determinadas pelo tipo e concentração das substâncias presentes no meio. De entre as mais relevantes no presente contexto têm-se: O *Coeficiente de Absorção* (a), que determina a taxa exponencial de decaimento do fluxo radiante por unidade de caminho óptico da luz no meio e por unidade de fluxo incidente; o Coeficiente de Espalhamento (b), define similarmente a taxa de decaimento exponencial devido ao espalhamento da luz. Ambos possuem dimensão L^{-1} (Kampel & Novo, 2008). Outra IOP importante a ser mencionada é o *Coeficiente de Retroespalhamento* (b_b), definido como integral da função de espalhamento volumétrico (VSF, $\beta(\theta)$) em função da distribuição angular de espalhamento em relação à direção da propagação da luz (θ). Portanto, o coeficiente de espalhamento (b) é a integração de $\beta(\theta)$ sobre θ , enquanto o coeficiente de retroespalhamento (b_b) denota a quantidade de luz espalhada para o hemisfério de retorno (IOCCG, 2011).

Apesar das definições citadas a cima, a radiância emergente na superfície do mar é pequena quando comparada à parcela derivada dos efeitos atmosféricos, também coletada pelo sensor. Tendo em conta que a atmosfera chega a contribuir com mais de 90% da radiância coletada pelo sensor, antes de estimar qualquer parâmetro relacionado a cor do oceano é necessário realizar correções para minimizar o efeito causados pelos constituintes atmosféricos, isto é, retirar da radiância coletada pelo sensor toda a parcela originada na atmosfera (Kampel & Novo, 2008; Menezes, 2001).

Uma das formas de classificar corpos de água em função de suas propriedades ópticas é através dos modelos bio-ópticos (Menezes, 2001), dentre os quais o mais amplamente utilizado é proposto por Morel & Prieur (1977) que introduz o conceito de classificação de águas do Caso 1 e Caso 2, sendo o primeiro caracterizado por ter o fitoplâncton como o principal responsável pelas variações nas propriedades ópticas da água, em contrapartida as águas ditas Caso 2, além do fitoplâncton, outras substâncias como as partículas inorgânicas em suspensão e as substâncias amarelas exercem influência nas propriedades ópticas da água. Assim, os modelos para estimativa da Chl_a têm maior probabilidade de êxito em águas tipo Caso 1.

De acordo com o processamento das informações provenientes dos satélites, os produtos são disponibilizados em diferentes níveis (Polito & Sato, 2003):

Raw - dados brutos coletados pelo sensor, intercalados com informações sobre data, horário, localização geográfica e qualidade dos dados.

Nível 0 (L0) - os dados brutos são ordenados no tempo e suas informações redundantes removidas.

Nível 1A (L1a) - os dados, ainda sem conversão em unidades físicas são reconstruídos removendo-se os artefatos incluídos para controle do processo de comunicação.

Nível 1B (L1b) – os dados de nível 1A sofrem correções radiométricas e são associados a coordenadas geográficas (geolocalizados ou georreferenciados). Neste nível os contornos dos continentes já não estão desalinhados nas imagens.

Nível 2 (L2) - os dados de nível 1B são processados de modo a transformar os sinais recebidos pelos sensores em variáveis geofísicas, mantendo-se a resolução e representação geográfica original. É de grande utilidade para estudos com necessidade de máxima resolução espacial e/ou temporal.

Nível 3 (L3) - Estudos baseados na análise de séries temporais de dados necessitam de dados periódicos, regularmente espaçados e cuja qualidade tenha sido consistentemente verificada. Para isso os dados de nível 2 são averiguados, interpolados para uma projeção geográfica padronizada e eventualmente filtrados. É o produto mais utilizado pela comunidade científica, mas têm, em geral, menor resolução espacial que os dados de nível L2.

Nível 4 (L4) - os dados de nível 3 são analisados e combinados com dados de outras fontes, criando-se um produto de interesse mais amplo.

O termo LUT (*Look-UpTable*) empregado ao longo do texto refere-se à tabelas de referência, comumente utilizadas para inferir um parâmetro através de outras variáveis. Essas tabelas possuem a função de otimizar a conversão da informação em um dado utilizável, geralmente fazem uso de grande quantidade de dados, parametrizações e equações.

3. Fundamentação dos Algoritmos

De acordo com (Brewin et al., 2011b), as abordagens para identificação e categorização fitoplanctônica pode ocorrer de 3 formas: uso de resposta espectral das propriedades ópticas para distinção de diferentes grupos de fitoplâncton; dependência da abundância do fitoplâncton para inferir informações sobre a estrutura de tamanho; dependência de outras informações em adição a dados da cor do oceano para distinguir os diferentes grupos dominantes.

Mais especificamente Devred et al. (2011) categoriza dois métodos para identificação de PSC: um baseado em propriedades ópticas inerentes resolvidas espectralmente, e outro baseado em algum tipo de medição de abundância (ex. concentração de Chla).

De uma forma geral, os algoritmos desenvolvidos para diferenciação fitoplanctônica, seja por tamanho de célula ou grupo funcional, pode ser efetuada através de análise de abundância ou dominância dos diferentes PFT/PSC, utilizando para tal, concentração de Chla, coeficientes de absorção e retroespalhamento ou razões empíricas de reflectância (baseada em concentração pigmentar das espécies); outros algoritmos são baseados em análise espectral, baseando-se em reflectâncias anômalas (de grupos funcionais dominantes), absorção e retroespalhamento do fitoplâncton (concentração de PSC), análise espectral/hiperespectral de absorção de PFT e retroespalhamento de partícula para inferir a distribuição do tamanho de células.

A figura 4 ilustra a relação do tamanho da célula com a concentração de Chla, demonstrando a contribuição (%) PSC no ambiente em função da concentração de Chla.

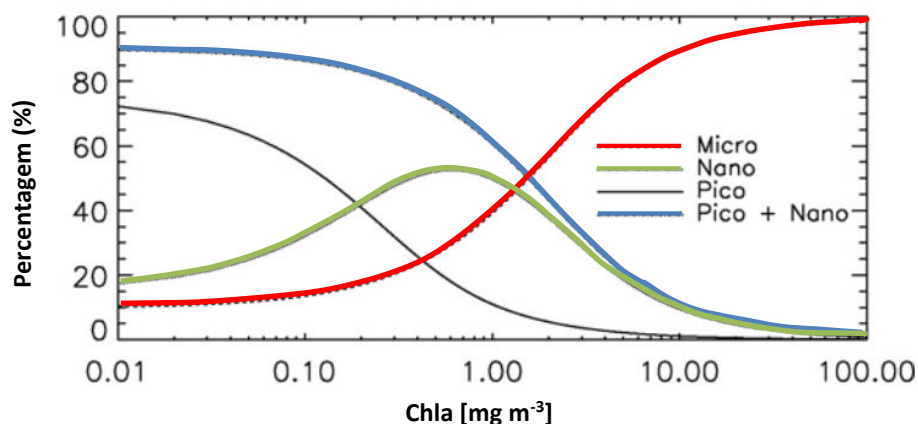


Figura 4: Contribuição em percentagem do tamanho de células em função da concentração de Chla. Modificado de Brewin et al. (2010).

3.1 Estado da Arte

De entre os algoritmos publicados e reconhecidos pela comunidade científica, alguns serão apresentados com o intuito de elucidar o estado da arte do referido tema e a maneira como os métodos diferem entre si, alguns abordando a temática de forma genérica e global, outros elucidando problemas regionais e mesmo tratando de espécies particulares.

3.1.1 Métodos baseados na concentração de clorofila e absorção:

Hirata et al. (2008) apresenta um modelo que conecta a absorção de fitoplâncton com PSC, que utiliza como variável, a absorção óptica no comprimento de onda de 443nm - $A_{ph}(443)$. O método foi desenvolvido para aplicação em dados do sensor SeaWiFS em composição de 8 dias com a utilização do modelo bio-óptico da NASA – NOMAD, que combina base de dados de pigmentos e dados ópticos.

Hirata et al. (2011) relaciona 10 classes de pigmentos (sendo representativo de 3 PSC e 7 PFT) com concentração de Chla para dados do sensor SeaWiFS de 1998 a 2009 e apresenta resultados de climatologia global para a distribuição de PFTs e PSCs.

Brewin et al. (2010) apresenta um modelo que calcula a fração de contribuição de 3 classes de tamanho de fitoplâncton para a concentração global de Chla no oceano Atlântico, considera que o total de Chla é a soma das concentrações de micro, nano e picofitoplâncton. O método é considerado simples e condiz com uma extensão do trabalho proposto por Sathyendranath et al. (2001), que se baseia no conceito de que células pequenas predominam em regiões de baixa concentração de Chla e células grandes condizem com regiões de altas concentrações deste pigmento (Figura 4). Ou seja, a população fitoplanctônica (PSC) é aferida de acordo com a concentração de Chla, neste caso proveniente do sensor SeaWiFS (L3 mensal mapeada). O método também incorpora o efeito da profundidade óptica nos parâmetros utilizados. A aplicação desta metodologia pode ser averiguada em Brewin et al. (2012), que envolve a temática de PSC com parâmetros físicos do Oceano Índico e em Brotas et al. (2013), que comprova o sucesso do método, apresentando um baixo valor de erro médio absoluto na comparação do modelo e dados *in situ* para a região nordeste do Atlântico (incluindo a costa portuguesa, Açores, monte submarino Gorringe e águas oligotróficas do Atlântico central), entre 2005 e 2010, sendo que parametrizações regionais foram efetuadas de acordo com medições de dados locais.

Pan et al. (2013), para a discriminação de 3 categorias de picofitoplâncton no mar da China, fazem uso de dados de concentração de pigmentos, clorofila total, zeaxantina e fucoxantina em associação a grupos fitoplanctônicos primários (Diatomáceas, *Synechococcus*, Haptophytas e *Prochlorococcus*). Para categorizar os grupos fazem uso do método de razão entre pigmentos acessórios e Chla. O algoritmo desenvolvido foi aplicado a imagens L2 do sensor MODIS-Aqua.

O método estatístico apresentado por Uitz et al. (2006) divide o oceano global em ambientes de águas misturadas e estratificadas, baseando-se na relação da profundidade da zona eufótica com a profundidade da camada de mistura. Apresenta uma parametrização da concentração de Chla próximo à superfície obtidas por satélite em relação a distribuição vertical de biomassa de fitoplâncton, e através dessa relação infere a composição de comunidades fitoplanctônicas (i.e. micro, nano e picofitoplâncton) ao longo da coluna de água, através da concentração superficial de Chla.

Mouw & Yoder (2010) classificam os métodos propostos por Hirata et al. (2008) e Uitz et al. (2006) como metodologias baseadas em relações empíricas que posteriormente são aplicadas aos dados satelitais de concentração de Chla para mapeamento de PSC.

3.1.2 Métodos que utilizam abordagem espectral:

▪ Anomalias de Reflectância:

Alvain et al. (2005, 2008, 2012) apresentam o método denominado PHYSAT, que discrimina grupos dominantes de PFT e baseia-se em anomalia de reflectância. Relaciona nLw (cf. secção 2, pág. 11) nos diferentes comprimentos de onda do espectro visível com as espécies de fitoplâncton. Utiliza para tal um grande inventário de pigmentos colectados *in situ*, pois afirma que nLw varia conforme a Chla e essas variações ocorrem devido as diferenças ópticas apresentadas pelas espécies de fitoplâncton. Esse algoritmo foi desenvolvido para escala global e empregado à nLw (412 – 555nm) do sensor SeaWiFS, que foram normalizados para remoção do efeito da Chla. Aplicações dessa metodologia podem ser conferidas em Alvain et al. (2006, 2013), Demarcq et al. (2012) e D'Ovidio et al. (2010).

O método TRICHOSAT, apresentado por Dupouy et al. (2011), para detecção de *bloom* de *Trichodesmium*, a principal colônia de cianobactérias na fixação de N e participação no sequestro de carbono, é baseado no espectro de radiância anômala observados em dados do sensor

SeaWiFS (L3 e L2) de 1998-2000 setorizados no sul ocidental do Pacífico tropical. O método é similar ao método de classificação do PHYSAT, que utiliza uma LUT de nLw de referência como função de Chla. No presente método a LUT empregada é em relação ao coeficiente de atenuação difusa (K490 - SeaWiFS).

Subramaniam et al. (2002) também desenvolveu um método de classificação multiespectral para identificação de *Trichodesmium spp.* para o sensor SeaWiFS, o esquema de validação consiste em concentração moderada de Chla e da espécie em região costeira, baseado na magnitude da reflectância no canal de 490nm e na forma do espectro das reflectâncias em 443, 490 e 555nm. Já Hu et al. (2010) desenvolveu um modelo para detecção de *bloom* de *Trichodesmium*, em uma região 'problemática' devido a complexidade óptica (interferência do fundo, escoamento continental, resuspensão de sedimento), na plataforma oeste da Florida. Primeiramente são identificados possíveis *blooms* da espécie através da elaboração de um índice - FAI (*Floating Algae Index*) para o sensor MODIS e em seguida realizado análise espectral desses 'patches'. O propósito é demonstrar a possível identificação da espécie também em águas costeiras opticamente complexas.

O algoritmo proposto por Shutler et al. (2010) para detecção de coccolitoforídeos, os quais executam um importante papel no ciclo do carbono e são a maior fonte de carbonato de cálcio nos oceanos, sendo este elemento, constituinte de seu esqueleto exterior. Este grupo fitoplanctônico possui a característica única de refletir e espalhar fortemente a luz, exibindo uma cor leitosa ou branco-turquesa detectada pelos sensores no espectro do visível, sendo portanto uma forma relativamente simples de identificação da espécie a partir da análise de composição de imagens em *true-color* (RGB) ou *pseudo-true-colour*. No entanto, a detecção de falsos *blooms* ocorre em águas costeiras devido principalmente a presença de material em suspensão. O autor descreve um modelo espectral para melhor identificar a espécie.

▪ **Métodos baseados em Absorção:**

Ciotti & Bricaud (2006) invertem as reflectâncias obtidas pelos satélites em coeficientes de absorção. Apresentam dois métodos de inversão que se destina a obter parâmetros de tamanho de células de fitoplâncton e coeficientes de absorção de matéria detritica colorida (CDM- *colored detrital matter*) a partir do coeficiente total de absorção, amplitude e comportamento espectral da luz, derivado de 5 canais do sensor SeaWiFS (412, 443, 490, 510, 555 nm). O primeiro baseia-se no método de decomposição da absorção total, e uma vez obtida a absorção fitoplanctônica, o parâmetro de tamanho (S_f) é estimado de acordo com Ciotti et al. (2002). O segundo método

fundamenta-se em uma técnica de otimização não-linear, técnica de inversão para reflectâncias difusa, que analisa a magnitude e forma do espectro de CDM e S_f . O algoritmo foi desenvolvido e aplicado em águas da plataforma continental brasileira. A parametrização proposta por Ciotti et al. (2002) contem uma explícita interpretação ecológica e dependência não ditreta com Chla (Mouw & Yoder, 2010).

Mouw & Yoder (2010) descrevem uma abordagem para obtenção da percentagem de microplâncton (S_{fm}), através da implementação de um modelo baseado em absorção óptica de acordo com uma LUT que incorpora a variabilidade de absorção e dispersão devido ao tamanho do fitoplâncton, a concentração de Chla, de substâncias dissolvidas e detritais no oceano global. Com base em uma dada combinação de IOPs (absorção e espalhamento) valores de AOPs ($R_{rs}(\lambda)$) são estimados através do *software* de transferência radioativa, Hydrolight. De uma maneira geral, a $R_{rs}(\lambda)$ é modelada para uma combinação de Chla e absorção de CDM (a_{cdm443}) no âmbito da LUT, que varia apenas em função da percentagem de microplâncton.

Aiken et al. (2007) relacionam radiância ascendente da água, pigmentos fitoplanctônicos, propriedades ópticas e parâmetros fotossintéticos para validação de produtos padrões do sensor MERIS (reflectância e Chla para águas Caso 1). A partir dos dados foram derivados características bio-ópticas para PFTs. Utilizando o coeficiente de retroespalhamento foi possível aferir distribuições de diatomáceas, dinoflagelados, coccolitoforídeos e outros flagelados, no sul do ecossistema Benguela.

Sathyendranath et al. (2004) exploram as diferenças nas propriedades ópticas das diatomáceas para desenvolver um algoritmo bio-óptico que distingue as comunidades de diatomáceas das demais populações de fitoplâncton na região do Atlântico noroeste. O modelo é elaborado para dados do sensor SeaWiFS, e a comparação com dados *in situ* demonstrou sucesso na distinção de comunidade de diatomáceas e não-diatomáceas na região. Uma derivação do algoritmo é então utilizada com o intuito de obter concentração de Chla, o procedimento é modificado em caso de ser detectado população de diatomáceas ou não. Os resultados demonstram que o modelo bio-óptico funciona melhor quando comparado com o algoritmo padrão (OC4) para estimativa de Chla do sensor SeaWiFS.

Devred et al. (2006), baseando-se no modelo de absorção do fitoplâncton de Sathyendranath et al. (2001), afirmam que o modelo pode ser utilizado para aferir o espectro de absorção específica (coeficiente de absorção por concentração de Chla) de dois componentes da população fitoplanctônica, células grandes (microfitoplâncton) e células pequenas (combinação

de pico e nanofitoplâncton), e propõem um novo modelo assumindo que as proporções destas variam conforme à concentração total de células. Devred et al. (2011) apresenta o aprimoramento deste trabalho, classificando os componentes da comunidade fitoplanctônica em 3 classes: pico, nano e microfitoplâncton. Modificações foram realizadas considerando a presença de fucoxantina no nanofitoplâncton.

O trabalho de Fujiwara et al. (2011) apresentam um algoritmo baseado em modelo de derivação de tamanho – SDM (*Size Derivation Model*), desenvolvido para altas latitudes e estima um índice para o tamanho do fitoplâncton através do coeficiente de retroespalhamento de material particulado em suspensão (incluindo algas) e coeficiente de absorção do fitoplâncton.

O modelo de regressão multivariado de mínimos quadrados parciais – PLS (*The Partial Least Squares regression approach*) proposto por Organelli et al. (2013), tem o intuito de obter a estrutura de tamanho do fitoplâncton (nano, pico e microfitoplâncton) proveniente do espectro de absorção de luz. O algoritmo foi desenvolvido baseado em longa série temporal de absorção hiperespectral de medições *in situ* de pigmentos e estrutura fitoplanctônica na região de Boussole (Mediterrâneo). Os resultados apontam bom rigor do método e abre caminho para aplicação da técnica.

A metodologia PHYTODOAS, proposta por Bracher et al. (2009), utiliza dados do sensor SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography*), que mede a radiação solar retroespalhada com alta resolução espectral (de 0.2 a 1.5 nm) nas bandas do Ultravioleta - Visível - Infra Vermelho Próximo, com uma resolução espacial de 30x30 km, com o intuito de identificar característica de absorção da composição dominante da população fitoplanctônica (diatomáceas e cianobactérias), utiliza o método de ‘espectroscopia de absorção óptica diferencial’ (DOAS - *Differential Optical Absorption Spectroscopy*), desenvolvido para escala global.

3.1.3 Método de Abordagem espectral com utilização de retroespalhamento de partículas (não considerando apenas fitoplâncton):

Modelo de estimação da distribuição do tamanho de partículas por satélites - PSD (*Particle Size Distribution*), proposto por Kostadinov et al. (2009), baseia-se na Teoria de Mie para modelar PSD em função do retroespalhamento espectral. O parâmetro de ‘lei de potência’ de PSD é obtido utilizando o coeficiente de retroespalhamento das partículas, o que torna algoritmo

independente da concentração de Chla e composição pigmentar. O declive da PSD é utilizado para definir os grupos fitoplanctônicos com base em classes de tamanho. O método é empregado em imagens mensais do SeaWiFS. O aprimoramento e a aplicação desta técnica é apresentada em Kostadinov et al. (2010), em qual os resultados são validados conforme dados de HPLC de diagnóstico de pigmentos, e também comparados com resultados das metodologias de Alvain et al. (2008) e Uitz et al. (2006).

4. Metodologia

Com intuito de analisar e avaliar as respostas dos algoritmos quando aplicados na costa oeste da Península Ibérica, no presente trabalho, serão explorados algumas das metodologias expostas, nomeadamente: o método PHYSAT; o algoritmo para a distinção de diatomáceas proposto por Sathyendranath et al. (2004); e o método PHYTODOAS.

O propósito é analisar o desempenho desses algoritmos quando aplicados em escala local, neste caso a costa portuguesa. Objetivando avaliar o desempenho obtidos com os diferentes métodos, os resultados serão comparados com dados de amostras coletadas *in situ*, as quais foram processadas e analisadas pela Instituto Português do Mar e da Atmosfera - IPMA. Os resultados de contagem de células para valores de abundância de organismos são apresentados em escala logarítmica, $\log(n^{\circ} \text{ de células} + 1)$.

Para o referido trabalho, a base de dados de imagens de satélite foi elaborada de acordo com 3 cruzeiros científicos desenvolvido no âmbito do programa Hab-Spot.

O cruzeiro 1 executado entre 14 a 16 de Setembro de 2006, o cruzeiro 2 decorreu entre 30 de Agosto e 05 de Setembro de 2010 e o cruzeiro 3 entre 09 a 15 de Setembro de 2011.

Foram utilizadas imagens de níveis 2 (L2) e 3 (L3), dos sensores SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* a bordo do satélite OrbView-2) e MODIS-Aqua (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* a bordo do satélite Aqua – EOS PM). As quais foram setorizadas entre as latitudes 44°N e 36°N e longitudes 7°W e 12°W.

4.1 Metodologia PHYSAT

O método qualitativo desenvolvido por Alvain et al. (2005) permite identificar assinaturas específicas de grupos fitoplanctônicos dominantes através do espectro de radiância mensurados por sensores de cor do oceano (Alvain et al., 2013). A metodologia PHYSAT baseia-se na forma e amplitude anômalas de nLw. Os valores das anomalias (nLw*) foram comparados com medições *in situ* de análise de pigmentos acessórios característico de cada grupo de fitoplâncton, também denominado de biomarcadores. Os valores de nLw* são considerados como variabilidade de sinal de segunda ordem, sendo preponderantemente utilizado por este método, visto que o sinal de primeira ordem obtidos pelos sensores é derivante da concentração de Chla (Figura 5), pigmento

presente em todos os grupos de fitoplâncton, não podendo assim ser utilizados para a diferenciação dos mesmos.

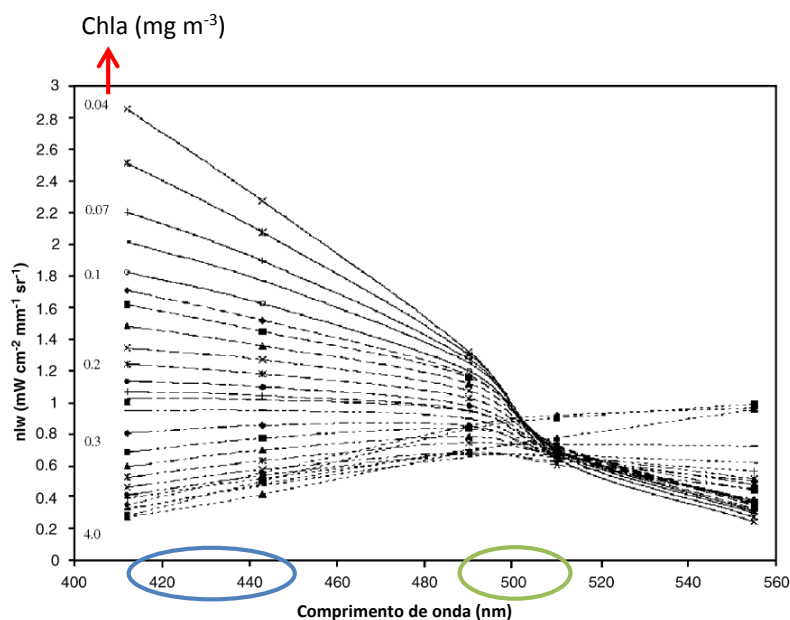


Figura 5: Ilustração do efeito de primeira ordem devido a Chla. Nota-se fortes picos na gama do espectro azul e verde. Fonte: Alvain et al (2005).

A metodologia foi desenvolvida para escala global e aplicada a imagens L3 do sensor SeaWiFS com resolução espacial de 9km. Alvain et al. (2005) obteve resultados satisfatórios para diferenciação de 4 grandes grupos de fitoplâncton: Haptophytas, diatomáceas, *Prochlorococcus* e *Synechococcus*-como cianobactérias (SLC). No entanto com o aprimoramento da referida metodologia apresentada por Alvain et al. (2008), dois outros grupos são incorporados: *blooms* de *Phaeocystis-Like* e *blooms* de coccolitoforídeos. O grupo das haptophytas, por serem compostos por nanoplânctons flagelados é referido como nanoeucariontes.

Descrição do Método:

A primeira informação obtida pelos sensores da cor do oceano, a nLw, é devido ao efeito da Chla. No entanto quando as diferenças entre os grupos não é evidenciada pelas medidas de radiação, métodos empíricos ou semi-empíricos devem ser desenvolvidos.

A metodologia PHYSAT baseia-se nas anomalias de reflectância e a primeira medida implementada pelo método é a remoção do efeito da Chla no sinal espectral. Para tal cria-se uma nova variável, a radiância emitida específica (nLw^*), que pode também ser chamada de anomalia da reflectância.

$$nLw^*(\lambda) = \frac{nLw(\lambda)}{nLw^{ref}(\lambda, Chla)}$$

Onde nLw é a radiância padrão mensurada pelo sensor baseados na concentração de Chla; nLw^{ref} é o valor de referência, que em supremacia deveria ser a função inversa do modelo bio-óptico OC4v4, mas como este baseia-se em escolhas entre diversas razões de reflectâncias não pode ser utilizado. O parâmetro de referência foi então definido empiricamente de acordo com uma grande gama de dados de Chla e nLw . Esses valores foram comparados com medições *in situ* adquiridos nas campanhas oceanográficas no âmbito do programa GeP&CO (*Geochemistry, Phytoplankton, and Color of the Ocean program* – para os oceanos Atlântico e Pacífico entre 1999 e 2002) e valores médios de $nLw(\lambda)$ foram calculados para 26 intervalos de valores de Chla, e por fim uma tabela de referência (LUT) foi gerada.

De acordo com o inventário de pigmentos adquiridos através das análises (HPLC, espectrofluorômetro e análise de pigmentos) das amostras *in situ*, foi possível estipular a relação entre pigmentos acessórios e os grupos dominantes de fitoplâncton (Tabela 1).

Tabela 1: Limiar relativo ao inventário de pigmentos para distinção dos grupos fitoplanctônicos, segundo Alvain et al. (2005).

	Phaeo a	Div a	Perid	Fucox	19'HF	Zeax
Diatomáceas	< 0.30	< 0.40	< 0.10	> 0.18	-	< 0.20
Prochlorococcus	< 0.30	> 0.40	< 0.10	-	-	> 0.35
Haptophytas	< 0.30	< 0.40	< 0.10	-	> 0.14	< 0.20
SLC	< 0.30	< 0.40	< 0.10	-	-	> 0.20
Dinoflagelados	< 0.30	< 0.40	> 0.10	-	-	< 0.20

Podendo assim relacionar os pigmentos acessórios como biomarcadores dos determinados PFTs (Tabela 2):

Tabela 2: Relação de pigmentos acessórios como biomarcadores de PFTs. Adaptado de Alvain et al. (2005).

Espécie característica	Pigmento Acessório	Abreviação
SLC	Zeaxantina	Zeax
<i>Prochlorococcus</i>	Divinil Chlorophyl a	Div a
Dinoflagelados	Peridinina	Perid
Nanoecariontes	19'Hexanoyloxyfucoxanthin	19'HF
Diatomáceas	Fucoxantina	Fucox
Produtos degradados	Phaeophytin a	Phaeo a

Mesmo apresentando pequena concentração de peridinina, não há inventário de pigmentos que classifiquem o grupo dos dinoflagelados, principalmente devido à ampla distribuição geográfica deste grupo, geralmente, representando um componente minoritário na estrutura da população fitoplancônica (Jeffrey et al., 1997, citado por Alvain et al., 2005), portanto este grupo foi desconsiderado nesta metodologia.

De acordo com a assinatura espectral de nLw^* para cada uma das comunidades fitoplancônicas, o estudo sugere uma boa relação entre a forma espectral e a amplitude do sinal de satélite. As haptophytas são caracterizadas por baixos valores de nLw^* em qualquer comprimento de onda, mas com uma diminuição de nLw^* da faixa de 443 para 412nm, os *Prochlorococcus* são associados a um espectro neutro, as SLC são caracterizadas por baixos valores de nLw^* , sendo este um pouco mais elevado em 412nm, e por fim as diatomáceas apresentam valores elevados de nLw^* e que decai gradualmente de 412 a 510nm.

A partir dessas inferências foi possível estabelecer um critério para diferenciação dos determinados grupos, elucidado na tabela 3.

Tabela 3: Critério estabelecido por Alvain et al. (2008) para diferenciação de PFT, baseado no espectro de nLw*.

	412nm	443nm	490nm	510nm	555nm	Critério adicional
Nano. min	0.4	0.55	0.6	0.6	0.6	$nLw^*(412) < nLw^*(443)$
Nano. max	0.8	0.9	0.95	1.0	1.0	$nLw^*(443) < nLw^*(490)$
Prochloroc. min	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	
Prochloroc. max	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
SLC min	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
SLC max	1.2	1.2	1.15	1.15	1.15	
Diatom. min	1.2	1.2	1.15	1.15	1.15	$nLw^*(412) > nLw^*(490)$
Diatom. max	2.2	1.8	1.5	1.4	1.4	$nLw^*(555) < nLw^*(490)$
Phaeocys.min	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	$nLw^*(412) < nLw^*(443)$
Phaeocy.max	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	$nLw^*(443) < nLw^*(490)$ $nLw^*(510) > nLw^*(555)$
Cocco.bloom min	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
Cocco.bloom max	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	

Para inferência dos dados de satélite a serem utilizados, emprega-se como critério de seleção em que os dados tenham pelo menos 3 *pixels* válidos entre 9; céu limpo; espessura óptica da camada de aerossol no comprimento de onda de 865nm < 0.15 (o que garante uma boa correção atmosférica); e uma gama de concentração de Chla de 0.02 a 4 mg.m⁻³ (para excluir a possível influência de águas costeiras e de águas ultra-oligotróficas).

No presente trabalho, foram utilizados os mesmos critérios para validação dos *pixels* e o algoritmo aplicado em escala global de imagens L3 do sensor SeaWiFS, sendo os resultados comparados com o exemplos da metodologia disponibilizado pelo *Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences* (LOG) disponível em: <http://log.univ-littoral.fr/Physat>. Posteriormente foi feita a tentativa de aplicação da metodologia em escala local, na costa oeste da Península Ibérica. Todos os testes foram inferidos inicialmente com imagens do sensor SeaWiFS L3, seguidamente em imagens L2 do mesmo sensor e posteriormente o algoritmo foi ajustado à bandas espectrais compatíveis e aplicados a imagens L3 e L2 do sensor MODIS-Aqua.

4.2 Metodologia para Distinção de Diatomáceas

Algoritmo desenvolvido e aprimorado por Sathyendranath et al. (2001, 2004) é um modelo bio-óptico desenvolvido para água Caso 1 para ser aplicado a imagens do sensor SeaWiFS. Consiste em diferenças na característica de absorção de comunidades fitoplanctônicas dominadas por diatomáceas e outros tipos de fitoplâncton (não-diatomáceas). Portanto compreende um modelo qualitativo de presença e ausência de diatomáceas nos *pixels* analisados.

Sathyendranath & Platt (1997) afirmam que o coeficiente de absorção do fitoplâncton em um determinado comprimento de onda, normalizado para concentração de Chla pode variar devido a diferença na composição de pigmentos e tamanhos das células da comunidade fitoplanctônica.

Alterações na composição pigmentar das assembleias de fitoplâncton pode aumentar de acordo com adaptações das populações existentes (decorrentes do regime de luz e nutrientes) ou mesmo pela alteração da comunidade em si.

Quando a composição de pigmentos muda, ocorrem alterações correspondentes no espectro de absorção característica do fitoplâncton. Além disso, a eficiência de absorção dos pigmentos decai de acordo com o aumento, tanto do tamanho da célula quando de concentração pigmentar intracelular. Stuart et al. (2000) indicam que a população de diatomáceas exibe coeficiente de absorção muito menor do que outras populações fitoplanctônicas.

A radiância emitida (*Water Leaving Radiance*) na faixa do azul e verde no espectro de luz do visível são usados em algoritmos da cor do oceano para obtenção da concentração de Chla. No entanto de acordo com Hoepffner & Sathyendranath (1992) a proporção de fucoxantina (pigmento comum em diatomáceas) em relação a Chla pode alterar a razão dos comprimentos de onda no verde-azul da absorção de fitoplâncton, podendo alterar assim a nLw.

O algoritmo desenvolvido pela NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) é aplicado sobre dados radiométricos medidos em 4 das bandas espectrais do sensor SeaWiFS para obter valores de concentração de Chla (O'Reilly et al., 1998). Este algoritmo é utilizado como padrão para elaboração de mapas globais de distribuição de clorofila das imagens de satélite. A versão 4 desse algoritmo (OC4) pode ter um menor rigor quando aplicado em escala local ou regional, isso devido a sensibilidade de tais algoritmos para alterações na composição das espécies de fitoplâncton presente na água (Sathyendranath et al., 2001).

Estudos apresentados por Hoepffner & Sathyendranath (1992), Morel (1997), Sathyendranath et al. (2001), Stuart et al. (2000), apresentam sub e super estimativa de Chla em função da comunidade fitoplanctônica existente, revelando que a aplicação de algoritmos universais para obtenção de concentração de chla pode não ser ideal, portanto a utilização de algoritmos parametrizados regionalmente torna-se mais aplicável.

O algoritmo em questão foi desenvolvido para a Costa Leste do Canadá no Atlântico Norte, região que apresenta dominância fitoplanctônica composto por diatomáceas. O algoritmo

difere populações dominadas por diatomáceas dos restantes grupos fitoplanctônicos. Para tal foi utilizado um modelo teórico da cor do oceano, que foi ajustado de acordo com a composição de pigmentos e medições de absorção de fitoplâncton das condições locais. O modelo é usado para distinguir a dominância de diatomáceas de populações mistas, e é aplicado aos dados do sensor SeaWiFS para obtenção de mapas de distribuição de diatomáceas na região.

Descrição do Método:

Os algoritmos utilizados com o propósito de análise da cor do oceano possuem geralmente natureza empírica. No entanto, existem modelos teóricos que expressam a radiância emitida como função de duas das propriedades ópticas inerentes da coluna de água: o coeficiente de absorção e retroespalhamento (Sathyendranath et al., 2001). O método aqui apresentado relaciona esses dois parâmetros com a reflectância na superfície do oceano.

O refinamento do algoritmo utilizado consiste na inserção de alguns parâmetros como: espalhamento Raman da água pura, e as representações da absorção da água pura e do fitoplâncton marinho.

Para cada concentração de Chla, um modelo é utilizado para calcular as reflectâncias que combinam com os valores médios ou centrais de 6 bandas espectrais do sensor SeaWiFS, ou seja, nos comprimentos de onda de 412, 443, 490, 510, 555 e 670nm. *Look-up tables* foram geradas a partir de pares de concordâncias de Chla e reflectâncias.

O modelo assume que a reflectância, logo abaixo da superfície ($z=0$), consiste na soma da reflectância associada com espalhamento elástico e Raman das partículas. O coeficiente elástico consiste em:

$$R^E(\lambda) = r \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

Onde, $a(\lambda)$ é o coeficiente de absorção em determinado comprimento de onda (λ), b_b é o coeficiente de retroespalhamento no mesmo comprimento de onda e r é fator de proporcionalidade.

A reflectância determinada segundo o espalhamento Raman é aplicada de acordo com a metodologia de Sathyendranath & Platt (1998), que inclui o termo de primeira ordem do espalhamento Raman (R^R) e um termo de segunda ordem de combinação entre a reflectância obtida na superfície decorrente de espalhamento Raman seguido de espalhamento elástico

ascendente (R^{RE}) e reflectância obtida na superfície decorrente de espalhamento elástico ascendente seguido de espalhamento Raman (R^{ER}).

O coeficiente de retroespalhamento (b_b) é expresso no modelo como a soma do retroespalhamento da água marinha pura e das partículas em suspensão (incluindo fitoplâncton).

O coeficiente de absorção (a) é calculado como a soma do coeficiente de absorção da água pura (a_w), substâncias amarelas (a_y) e fitoplâncton (a_p):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_y(\lambda)$$

A absorção decorrente do fitoplâncton foi parametrizada de acordo com resultados de HPLC de amostragem *in situ*, e foi também utilizada para a caracterização de populações dominadas por diatomáceas e não-diatomáceas, sendo que as estações com a razão de clorofila-c3 e Chla < 0.02 e a razão de fucoxantina e Chla > 0.4 foram consideradas como estações dominadas por diatomáceas.

O coeficiente de absorção das diatomáceas e população mista (a_p) para cada uma das 6 bandas espectrais do SeaWiFS e as correspondentes fontes de espalhamento Raman foram então parametrizados como função não linear da concentração de Chla (HPLC).

O modelo abrange um *range* de Chla de 0.01 a 40 mg m⁻³ e cria 2 conjuntos de LUT's, uma para cada uma das populações definidas (diatomáceas e população mista). O algoritmo desenvolvido baseia-se em razões de reflectâncias, o que auxilia na redução de erros.

No entanto a nLw nos pequenos comprimentos de ondas de 412 e 443nm podem ser muito influenciados pela absorção de substâncias amarelas. Mesmo o algoritmo sendo desenvolvido para águas Caso 1, notou-se a obtenção de valores negativos irrealistas de nLw nesta faixa espectral, indicando problemas com a correcção atmosférica, portanto, esses comprimentos de onda foram excluídos da análise, sendo por fim utilizadas a radiância obtidas nos canais de 490, 510, 555 e 670nm.

Para cada *pixel* a reflectância do sensor (R_{rs}) normalizada foi calculada para os quatro comprimentos de onda utilizados no algoritmo.

A concentração de Chla é então estimada utilizando as razões de 510:555 e 490:670, assumindo o critério para população de diatomáceas. A diferença entre os valores de Chla calculados foi então estimada e normalizada para os 2 valores. O mesmo foi feito considerando população de não-diatomáceas.

Assim os *pixels* podem ser definidos com predominância de diatomáceas ou populações mistas em função das diferenças normalizadas calculada para os dois casos.

O algoritmo foi testado para médias quinzenais, e para cada *pixel* a informação de todas as imagens foram usadas para calcular o número de vezes que um pixel era identificado como sendo dominado por diatomáceas. Esse número foi então dividido pelo número total de imagens com *pixels* validos utilizadas para determinar a probabilidade de que o local foi efetivamente dominado por diatomáceas durante o período investigado.

A metodologia foi validada mediante a comparação dos resultados obtidos através da aplicação do algoritmo com observações *in situ*.

No presente trabalho a metodologia foi aplicada a imagens diárias L2 do sensor SeaWiFS e MODIS-Aqua, setorizadas na costa oeste da Península Ibérica, e consiste na avaliação e determinação de presença e ausência de diatomáceas nos determinados *pixels* analisados. Foram testadas duas LUT's com o intuito de avaliar a que melhor se adequa a área de estudo, das quais, uma foi desenvolvida para o Atlântico noroeste, área com predominância de diatomáceas, e outra desenvolvida para utilização na costa leste do Pacífico Sul, área caracterizada por frequentes e fortes ressurgências costeiras.

A aplicação do método contou com a colaboração e apoio dos pesquisadores Emmanuel Devred (*Université Laval*, Canadá) e Shubha Sathyendranath (*Plymouth Marine Laboratory* - PML, Reino Unido). A aplicação do algoritmo foi efectuada com auxílio do *software* SeaDAS (versão 6.4).

4.3 Metodologia PhytoDOAS

Metodologia apresentada por Bracher et al. (2009) consiste em um método quantitativo para identificação dos principais grupos funcionais de fitoplâncton utilizando dados de sensor hiperespectral. O grande objetivo imposto por esta metodologia é a separação de diferentes grupos através de observações espectrais resolvidas de radiação solar retroespalhada no topo da atmosfera.

O sensor SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography*), a bordo do satélite europeu ENVISAT, foi desenvolvido e é maioritariamente utilizado para aferir informações geofísicas sobre a composição dos constituintes traços da

atmosfera terrestre. No entanto, um objetivo secundário é a observação e interpretação da cor do oceano.

Vountas et al. (2007) demonstraram ser possível a identificação da absorção fitoplanctônica com dados do sensor SCIAMACHY, utilizando o método DOAS (*Differential Optical Absorption Spectroscopy*). Essa técnica foi adaptada para a obtenção da absorção e biomassa de grupos de fitoplâncton (PhytoDOAS) através do SCIAMACHY, que mensura o retroespalhamento da radiação solar electromagnética na região do espectro UV – Visível – Infravermelho próximo (240 - 2380 nm), com elevada resolução espectral (0.2 a 1.5 nm).

A razão sinal-ruído de SCIAMACHY entre 340 a 500 nm é superior a 2000 (Bovensmann et al., 1999) em cada comprimento espectral de 0,2 a 0,4 nm, o que é mais sensível do que o valor de 1650 para as bandas de frequências espectrais semelhantes do sensor MERIS (Bézy et al., 2000). O tamanho do *pixel* do sensor SCIAMACHY é bastante grande, sendo aproximadamente de 30 x 30 km, na melhor das hipóteses. Devido a isso, e a resolução temporal relativamente baixa por causa da alternância de visualização *nadir-limb* do SCIAMACHY, a aplicação da cor do oceano para estes dados são limitados ao mar aberto e requer análises por longos períodos de tempo.

A metodologia DOAS explora as características espectrais acentuadas que são causadas pela absorção molecular dos constituintes atmosféricos, características espectrais de redistribuição induzida pelo ‘efeito de Anel’ (*Ring Effect*) ou espalhamento Raman vibratório (VRS) em águas oceânicas ou características de absorção até mesmo de plantas terrestres e plâncton marinho.

Inicialmente a metodologia foi utilizada para a identificação de dois grandes grupos dominantes, diatomáceas e cianobactérias (Bracher et al., 2009). Posteriormente, Sadeghi et al. (2012) propõem a inclusão dos grupos dos coccolitoforídeos e dinoflagelados à metodologia.

O que distingue esta técnica é a análise quantitativa dos grupos fitoplanctônicos e a tentativa de aplicação dessa metodologia consiste na alta resolução espectral capaz de diferenciar espécies como dinoflagelados e diatomáceas, o que muitas vezes não é possível com outros algoritmos.

Descrição do método:

O algoritmo DOAS determina a quantidade de um absorvente molecular ao longo do caminho óptico da luz observado através de ajuste de mínimos quadrados de uma combinação

linear da absorção de referência da secção transversal de espectros de gases traço, do espectro de referência de anel (*Ring effect*, ou espalhamento Raman rotacional para moléculas de ar), do espectro de espalhamento Raman Vibratório (VRS) e no específico caso, a absorção do fitoplâncton (fito). Ou seja:

$$\tau(\lambda, s) = \ln \frac{I(\lambda, s)}{I_0(\lambda)}$$

$$= \sum_i (\lambda) \times S_i(s) + \sigma_{RING} \times S_{RING}(s) + \sigma_{VRS} \times S_{VRS}(s) + \sigma_{fito} \times S_{fito}(s) - \sum_{k=0}^n a_k \lambda^k$$

Onde: $\tau(\lambda, s)$ é a inclinação medida de densidade óptica; I é a radiância retroespalhada (medida no topo da atmosfera); I_0 é a irradiância extraterrestre; $\sigma_i(\lambda)$ condiz com secção transversal de absorção diferencial de i molécula atmosférica no comprimento de onda λ ; $S_i(s) = \int_s \rho_i C(s) ds$ é o número de densidade integrada ao longo da inclinação do percurso óptico s ; $\sum_{k=0}^n a_k \lambda^k$, tipicamente $n \leq 4$, é subtraído da profundidade óptica medida na equação para remover a estrutura de *broad-band* resultante da componente de variação lenta da absorção molecular, Rayleigh e espalhamento Mie.

Uma regressão linear dos mínimos quadrados com o S_i , S_{RING} , S_{fito} , S_{VRS} e o coeficiente de regressão a_k como parâmetros de ajuste é realizado. Os parâmetros mais importantes obtidos através da PhytoDOAS são S_{fito} (mg Chla m⁻²) e S_{VRS} (adimensional), sendo, respectivamente, o fator de ajustes (*fit factor*) atribuídos ao espectro de absorção de PFT e a assinatura espectral de VRS (Sadeghi et al., 2012).

Apenas o espectro de retroespalhamento solar do SCIAMACHY sob condições de céu limpo, obtido em ângulo zenite solar inferior a 60° foram considerados para análise.

A técnica DOAS é utilizada para separar e, assim, recuperar as estruturas de maior absorção de frequências de banda larga. No entanto, o método pode conduzir a erro se o espectro de referência utilizado no ajuste tiver correlação espectral, isto é, o algoritmo de ajuste não será capaz de distinguir entre as características espectrais semelhantes. Para uma qualidade de ajuste métrica, os valores de Qui-quadrado (χ^2) são frequentemente utilizados, sendo que, valores elevados de χ^2 indicam má qualidade de ajuste.

A fim de recuperar a biomassa de fitoplânctônica a partir de dados do SCIAMACHY, o método PhytoDOAS utiliza separadamente dois ajustes-DOAS em janelas de comprimento de onda diferentes para o mesmo conjunto de dados SCIAMACHY. O primeiro, na gama do visível,

gera a intensidade de absorção de um grupo específico de fitoplâncton e o segundo, no UV-A é utilizado para produzir o factor de ajuste do VRS.

O ajuste-DOAS foi aplicado a imagens globais com range espectral de 429.0 a 495.0nm, representando contribuições ópticas de gases atmosféricos traço, efeito do anel, absorção de grupos fitoplanctônicos e o primeiro auto-vetor da análise de componentes principais (PCA).

Para a adaptação da absorção de fitoplâncton, são utilizados espectros de referência para a absorção de cianobactérias e diatomáceas obtidos a partir de medições de absorção de amostras de água de diferentes regiões do Oceano Atlântico e caracterizados por análise de pigmentos. A partir destas análises foi possível inferir diferenças de absorção dos constituintes traço do ozônio, vapor de água, NO₂, CHOCHO (C₂H₂O₂/Glyoxal) e O₄.

Para converter o fator de ajuste SCIAMACHY ou colunas oblíquas de absorção para as diatomáceas e cianobactérias em concentração expressa em [mg Chla.m⁻³], é necessário a informação da profundidade de penetração da luz (δ). O factor de ajuste S_{fito} é expresso em [mg Chla.m⁻²], relativo a massa. Se a profundidade de penetração da luz para a janela de comprimento de onda considerado é conhecido, esta coluna pode ser convertida em concentração de Chla.

$$Chla = \frac{S_{fito}}{\delta}$$

Sadeghi et al. (2012) afirma que o principal desafio para a identificação de mais PFTs através do PhytoDOAS é superar os efeitos da correlação entre diferentes espectros de absorção de PFT. Ou seja, diferentes PFTs são compostos de diferentes tipos e quantidades de pigmentos, no entanto possuem pigmentos em comum, por exemplo, Chla, o que causa efeitos de correlação no desempenho habitual na aquisição e identificação dos grupos pelo PhytoDOAS. O referido trabalho apresenta o aprimoramento da técnica PhytoDOAS e faz uso da quarta derivada da espectroscopia, para obter as posições dos picos principais dos componentes pigmentares de cada espectro de absorção. Depois de comparar os correspondentes resultados com os PFTs, foi estabelecida uma janela de ajuste otimizada para a identificação de comunidades fitoplanctônicas, incluindo novos grupos como coccolitoforídeos e dinoflagelados.

No presente trabalho a aplicação do método PhytoDOAS somente foi possível devido a colaboração da pesquisadora Astrid Bracher associada ao instituto alemão AWI (*Alfred-Wegener-Institute*), que aplicou a metodologia para a costa de Portugal. Os dados possuem resolução espacial de 30 x 60 km e são aplicados em imagens de médias mensais dos períodos em que decorreram os cruzeiros científicos em questão.

5. Resultados

5.1 Metodologia PHYSAT

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo PHYSAT em escala global de imagens L3 do sensor SeaWiFS são bastante similares com o exemplo da aplicação da metodologia disponibilizada como ferramenta demonstrativa pelo grupo LOG. O resultado comparativo para imagem do dia 17.Ago.2002 pode ser observado nas figuras 6 e 7, nas quais, assim como nos primeiros resultados apresentados por Alvain et al. (2005), efetua-se a separação de quatro grupos de fitoplâncton dominantes: Haptophytas (azul), diatomáceas (vermelho), *Prochlorococcus* (verde) e SLC (amarelo).

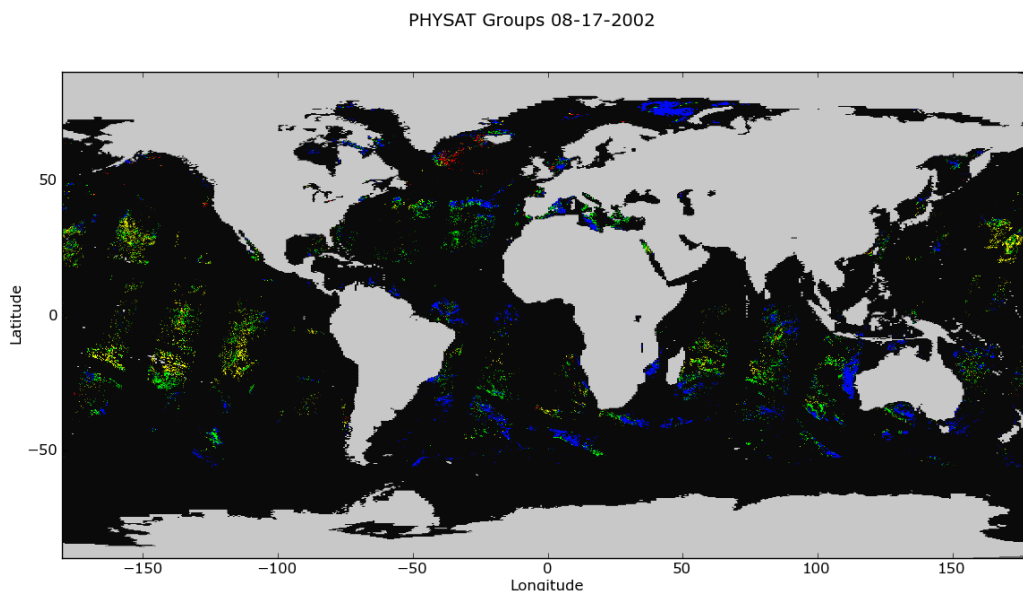


Figura 6: Exemplo de aplicação da metodologia PHYSAT para imagens L3 do sensor SeaWiFS de 17.Ago.2002, disponibilizado pelo *Laboratoire d’Océanologie et de Géosciences* (LOG). A cor azul corresponde ao grupo das Haptophytas, vermelho às diatomáceas, verde os *Prochlorococcus* e amarelo ao *Synechococcus*-como cianobactérias.

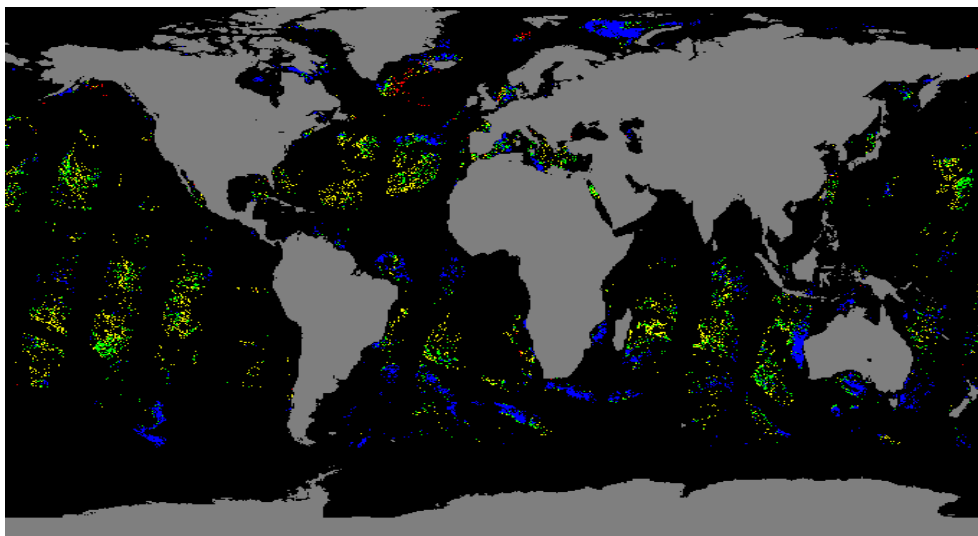


Figura 7: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em imagem L3 do sensor SeaWiFS de 17.Ago.2002. A cor azul corresponde ao grupo das Haptophytas, vermelho às diatomáceas, verde os *Prochlorococcus* e amarelo as *Synechococcus*-como cianobactérias.

Com a apresentação satisfatória desse resultado preliminar, o PHYSAT foi aplicado a escala local, abrangendo a região oceânica e costeira de Portugal e Galícia. Inicialmente a metodologia foi aplicada a imagens L3 do sensor SeaWiFS, para os períodos coincidente com os cruzeiros científicos em questão. A imagem do dia 29.Ago.2010 foi a que apresentou melhor resultado sendo apresentado na figura 8. O modelo aprimorado de Alvain et al. (2008) foi utilizado, sendo, portanto, realizada a separação de 6 grupos fitoplanctônicos dominantes: nanoeucariontes (azul), diatomáceas (vermelho), *Prochlorococcus* (verde), SLC (amarelo), *Phaeocystis-Like* (roxo) e bloom de coccolitoforídeos (laranja).

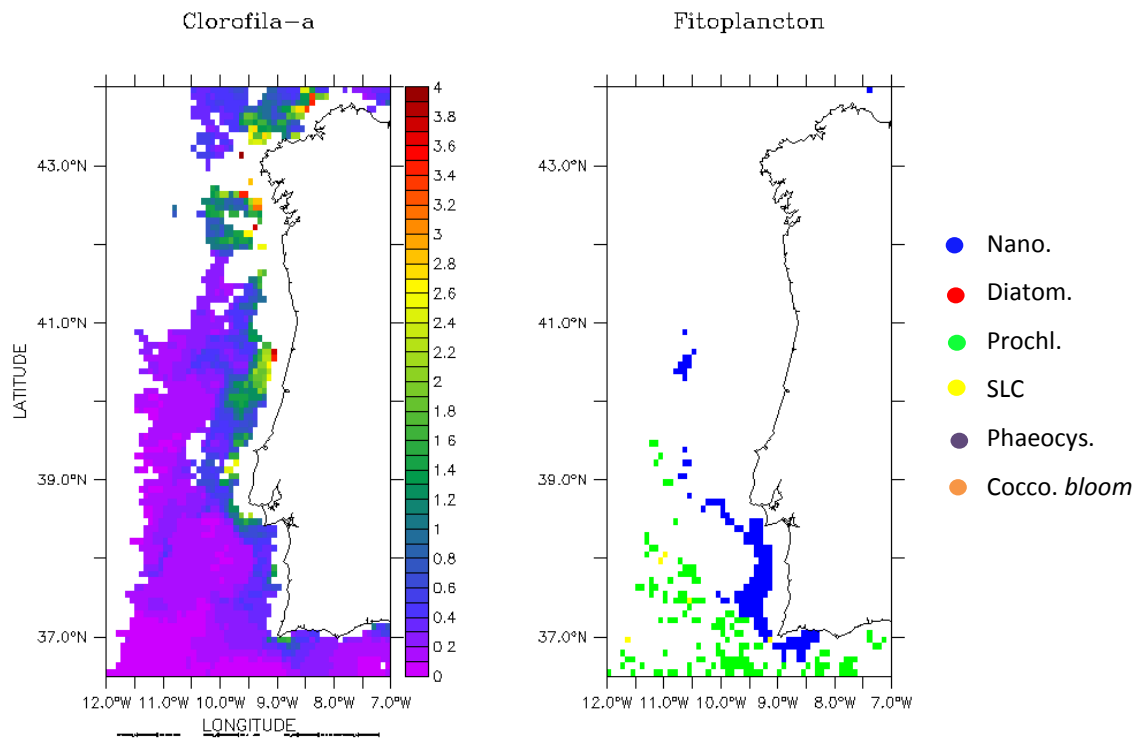


Figura 8: Resultado da aplicação da metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L3 do sensor SeaWiFS do dia 29.Ago.2010. À esquerda, representação da concentração de Chla e à direita os grupos de fitoplâncton dominante.

Para remover efeitos de pré processamento das imagens decorrentes em imagens de nível L3 o método foi aplicado a imagens L2 do sensor SeaWiFS (Figura 9), pois estas mantem a resolução espacial original, garantindo uma máxima resolução espacial/temporal dos dados sem que tenha ocorrido a utilização de filtros ou interpolação dos dados (cf. secção 2, pág. 13).

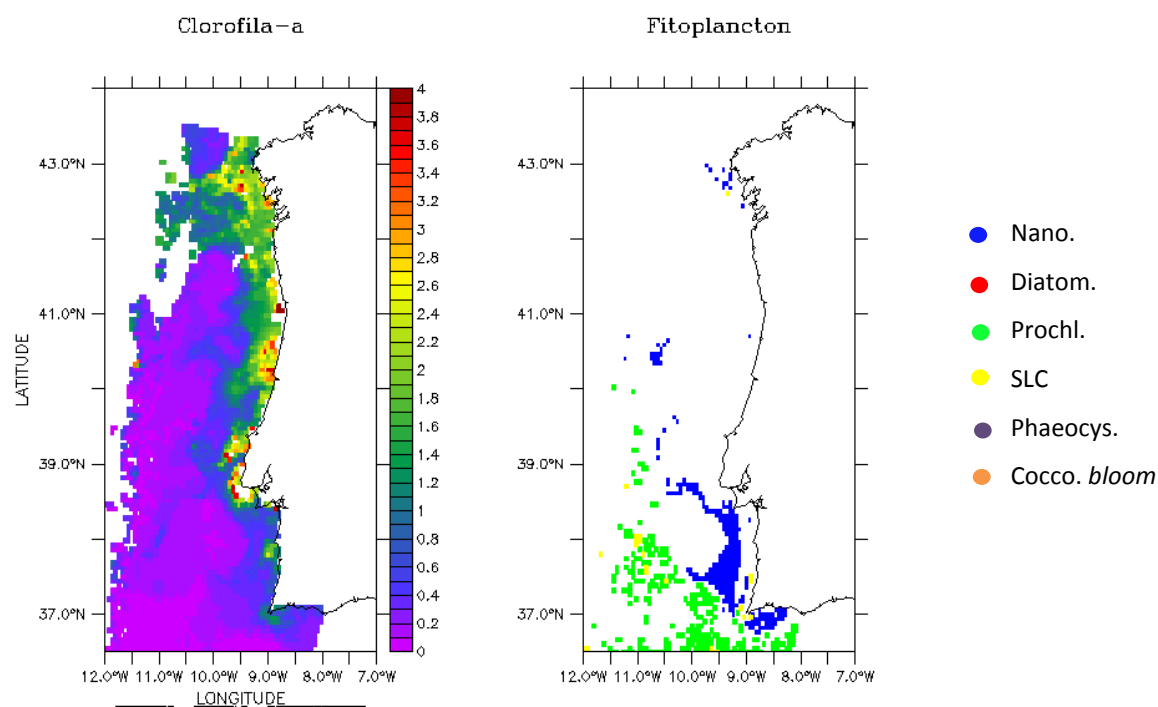


Figura 9: Resultado da aplicação da metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L2 do sensor SeaWiFS do dia 29.Ago.2010. À esquerda, representação da concentração de Chla e à direita os grupos de fitoplâncton dominante.

Apesar dos bons resultados apresentados com a aplicação do método em dados do sensor SeaWiFS, realizou-se testes comparativos com imagens do sensor MODIS-Aqua. Apesar de ambos operarem em altitude de 705 km e apresentarem resoluções semelhantes (1,1 e 1 km no nadir respectivamente), o SeaWiFS apresenta 8 bandas espectrais e largura de varrimento de 2800 km, utilizadas na detecção remota da cor do oceano, enquanto que, das 36 faixas do sensor MODIS-Aqua, 13 são utilizadas para cor do oceano, com largura de varrimento de 2330 km, garantindo assim uma melhor resolução espectral. A metodologia portanto, foi aplicada então a imagens L3 e L2 desse sensor, para o mesmo período da imagem do sensor SeaWiFS, como pode ser observado, respectivamente, nas figuras 10 e 11.

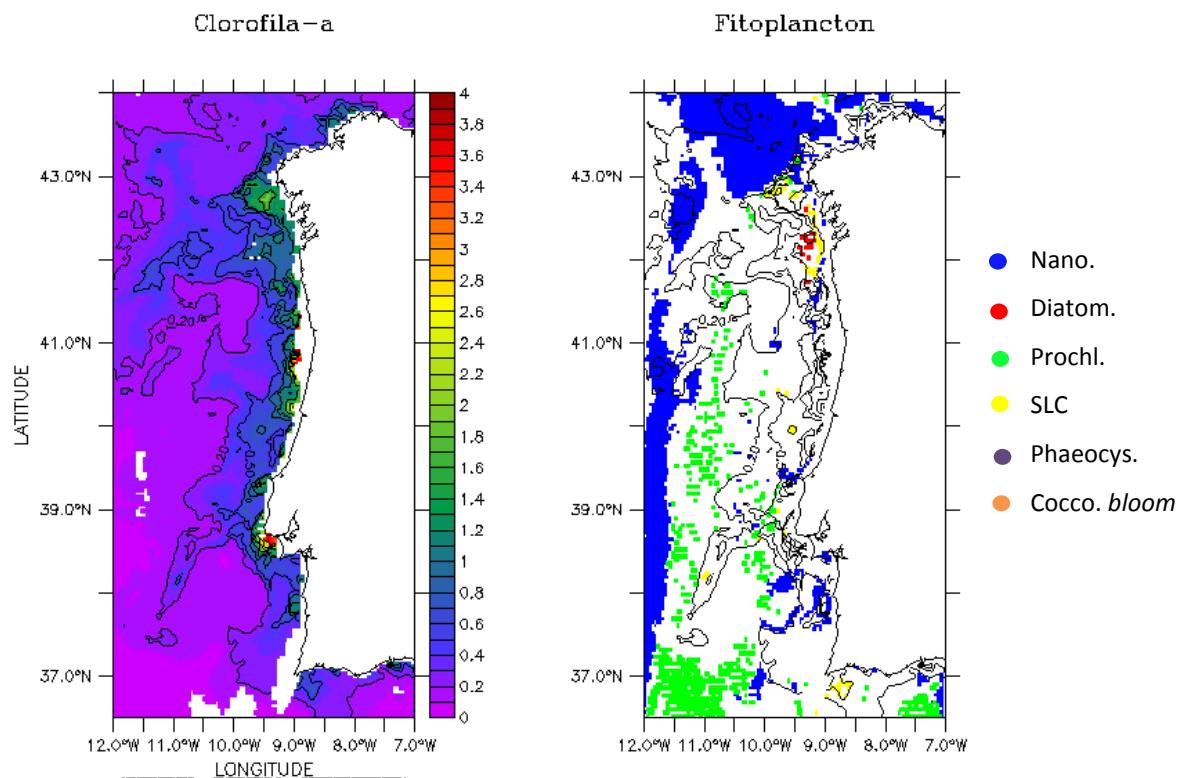


Figura 10: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L3 do sensor MODIS-Aqua do dia 29.Ago.2010. Ilustrando a concentração de Chla (esquerda) e os grupos de fitoplâncton dominantes (direita).

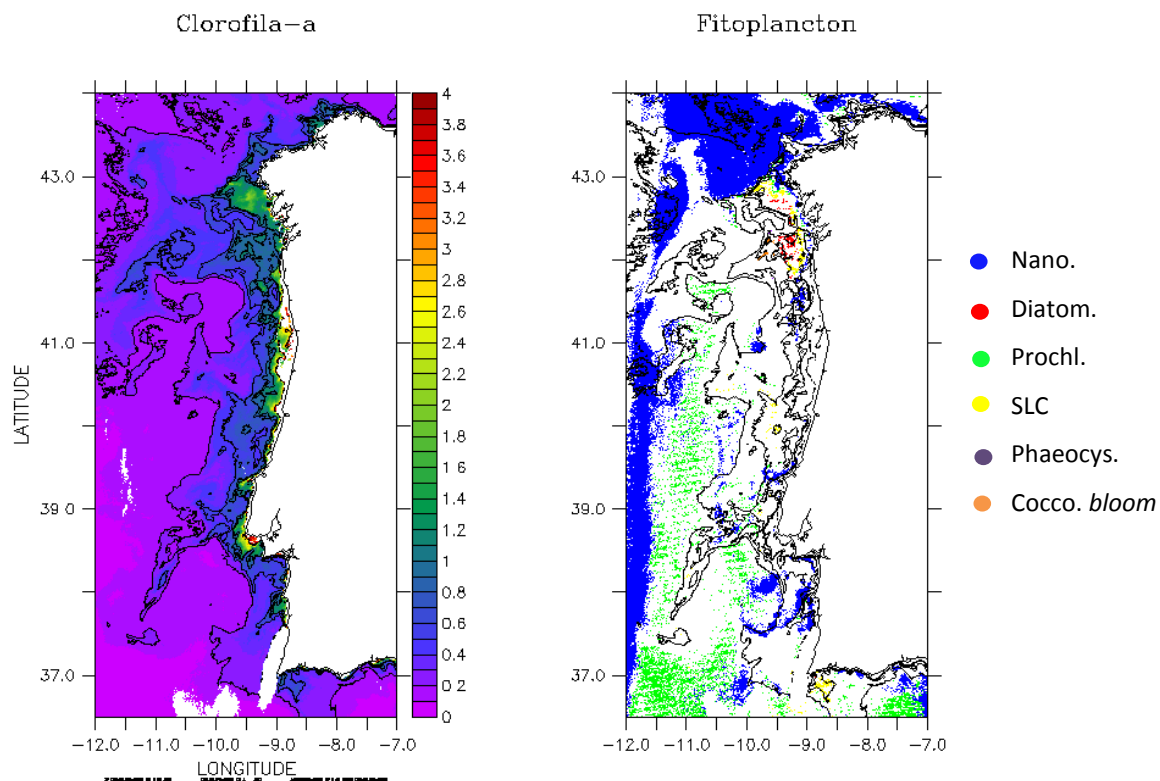


Figura 11: Resultado de aplicação de metodologia PHYSAT em escala regional para imagem L2 do sensor MODIS-Aqua do dia 29.Ago.2010. Ilustrando a concentração de Chla (esquerda) e os grupos de fitoplâncton dominantes (direita).

Apesar de ter sido necessário a realização de aproximações das bandas espectrais dos sensor SeaWiFS para MODIS-Aqua para obedecer o critério de diferenciação dos grupos funcionais, a metodologia, quando aplicada a imagens L2 apresenta-se de forma satisfatória.

No entanto, é notável a não determinação dos grupos dominantes na região próxima a costa centro-norte de Portugal, independente do sensor e nível de processamento utilizado.

Nas figuras 10 e 11 é possível observar a detecção de um suposto *bloom* de diatomáceas em frente às Rias Galegas, o que apesar da ausência de dados *in situ* para efectivar comprovação, é referido na literatura (Crespo et al., 2012, 2011; Espinoza-González et al., 2012; Tilstone et al., 1994) como evento esperado, devido à inserção de nutrientes provenientes de aporte continental.

O grupo *Prochlorococcus* se distribui de maneira bastante demarcada (Figura 11), o que é compatível com baixos valores observado na imagem de concentração de Chla. É possível observar um padrão semelhante quando se analisa separadamente as reflectâncias nos diferentes canais espectrais, sendo, Rrs_412 a que melhor elucida a comportamento deste grupo (Figura 12a). A característica marcada do grupo também pode ser observada nas imagens de TSM, ocupando região de águas mais quentes (Figura 12b).

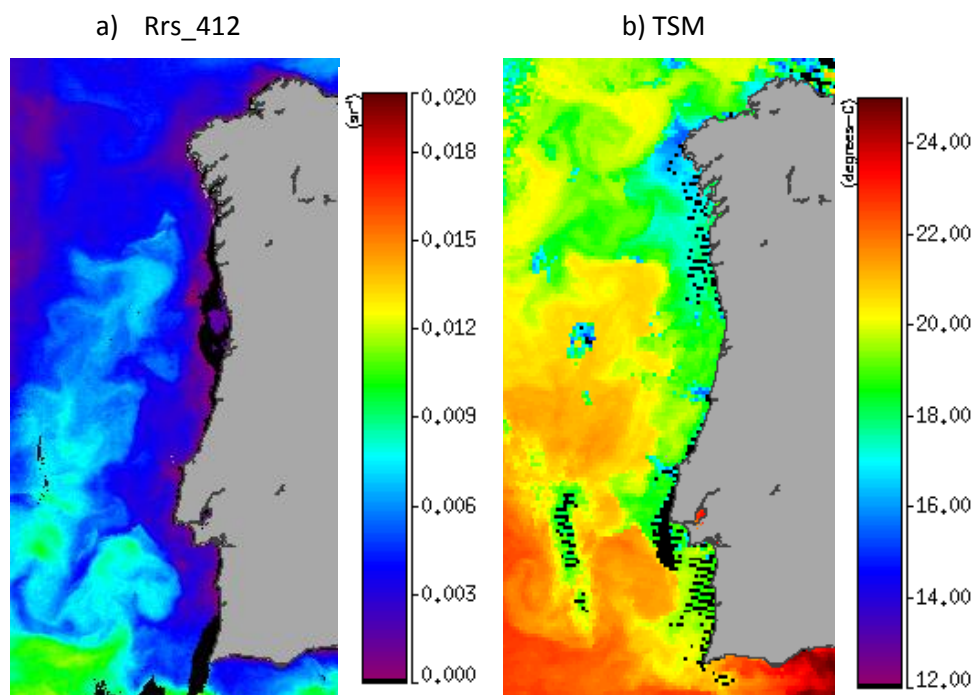


Figura 12: Ilustração da reflectância obtida em Rrs_412 (a) e TSM (b) para o dia 29.Ago.2010.

A figura 13 elucida uma outra característica positiva observada na metodologia PHYSAT aplicada a costa portuguesa, que corresponde a evolução ecológica das comunidades fitoplanctônicas na região.

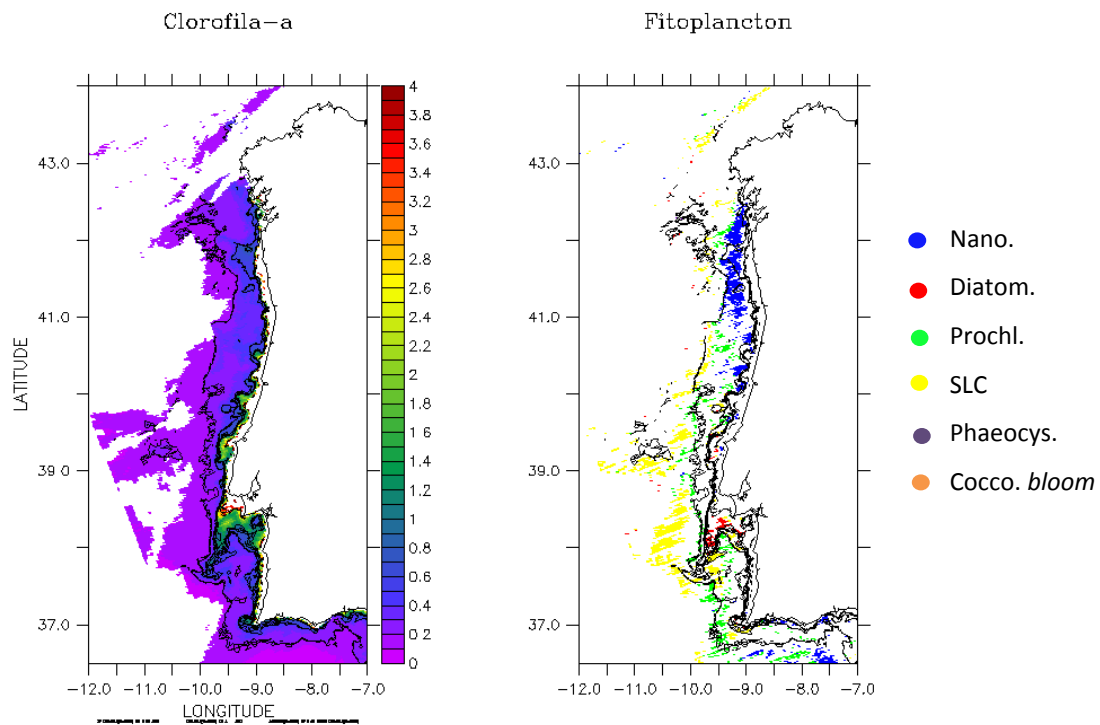


Figura 13: Resultado do PHYSAT para imagem L2 do sensor MODIS-Aqua para o dia 13.Set.2011. Elucidação da evolução ecológica da comunidade fitoplanctônica em período de *upwelling*.

Nota-se que cada grupo ocupa um nicho específico, com o grupo SLC ocupando a região mais a *offshore*, seguindo em direção a costa encontra-se os *Prochlorococcus*, seguidos dos nanoeucariontes ou haptophytas mais internamente, e supostamente, na região costeira seria esperado a detecção de diatomáceas decorrente do afloramento costeiros característico da época e da região em questão. No entanto este último grupo não foi identificado pelo método PHYSAT na maior parte dos dados da zona costeira.

5.2 Metodologia para Distinção de Diatomáceas

Os resultados obtidos com a implantação do método para distinção das diatomáceas dentre os demais grupos fitoplanctônicos foi considerado satisfatório, pois correlaciona áreas de

detecção de diatomáceas com regiões de elevados valores de concentração de Chla, muitas vezes associados a ressurgências costeiras. Ou seja foi possível inferir relação entre a predominância de diatomáceas com fenómeno físico oceanográfico decorrente na região.

Inicialmente foi realizado teste comparativo entre duas LUT's existentes e desenvolvidas para áreas distintas. O resultado da implementação é apresentado na figura 14, sendo a figura 14a, correspondente a padrões de diatomáceas encontradas no Atlântico noroeste, enquanto a figura 14b, ilustra o resultado encontrado para a LUT desenvolvida para a costa chilena.

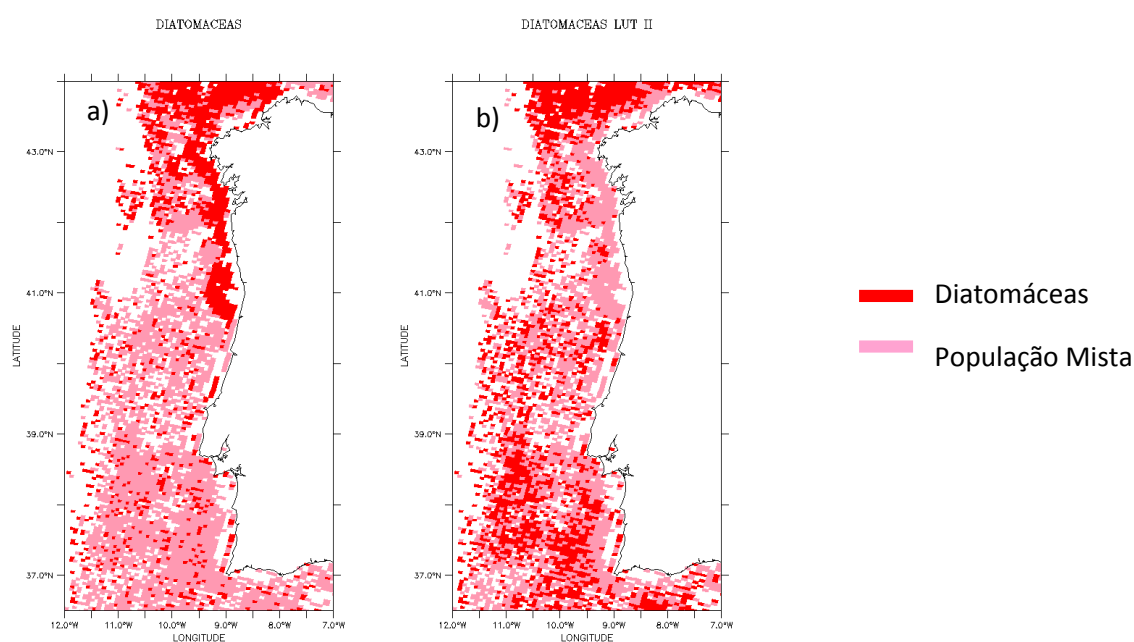


Figura 14: Resultado comparativo da aplicação de 2 *look-up tables*, uma com base em dados do Atlântico noroeste (a) e outra do Pacífico sudeste (b). Aplicação em imagem L2 do sensor SeaWiFS de 29 de Agosto de 2010.

Aparentemente a LUT desenvolvida para a costa Chilena (Figura 14b), em função das diatomáceas associadas a *upwelling* costeiro, não detecta a ocorrência de diatomáceas na costa portuguesa e galega e superestima a detecção do grupo nas áreas *offshore*.

Contrariamente, o resultado obtido para a LUT do noroeste atlântico (Figura 14a), é bastante compatível com dados observacionais de contagem de células das amostras *in situ* da campanha oceanográfica de Agosto/Setembro de 2010 (Figura 15).

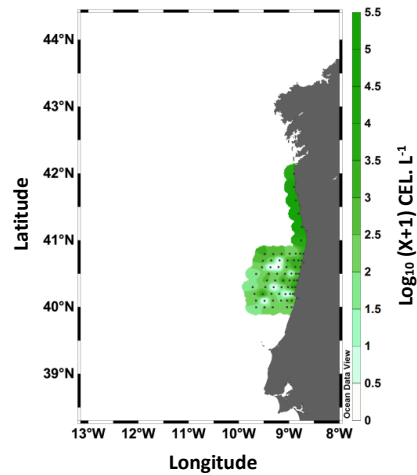


Figura 15: Resultado de contagem de células de diatomáceas para o cruzeiro de verão de 2010.

A fim de melhor inferir a detecção de diatomáceas na costa portuguesa, optou-se por observar os padrões encontrados nos diferentes canais espectrais do sensor SeaWiFS (Figura 16). Podendo fazer inferência a banda de 510 nm para observação da distribuição dessa comunidade.

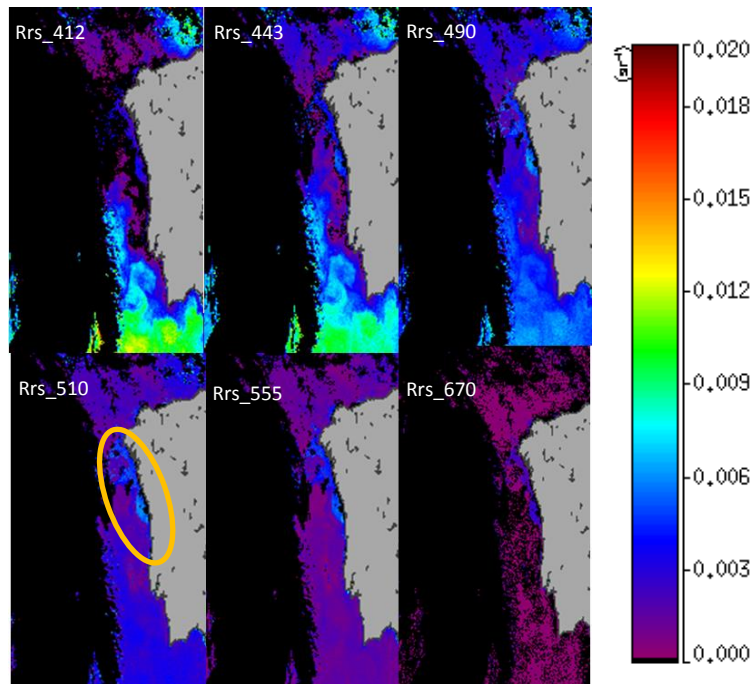


Figura 16: Ilustração da reflectância obtida nas diferentes bandas espectrais do sensor SeaWiFS (29.Ago.2010).

Apesar de ter sido desenvolvido para reflectâncias de imagens L2 do SeaWiFS, realizou-se teste com imagens L2 do sensor MODIS-Aqua (Figura 17a), executando as devidas aproximações espectrais, para a imagem de 14 de Setembro de 2011. O resultado, quando comparado com a reflectância na banda de 531nm (Figura 17b) (aqui, comparável com a reflectância em 510nm do SeaWiFS) e com a concentração de Chla (Figura 17c), é possível observar o mesmo padrão de distribuição. Nos locais onde ocorre a identificação das diatomáceas (principalmente junto a costa), coincide com as zonas de maiores reflectâncias em 531nm e maiores concentrações de Chla.

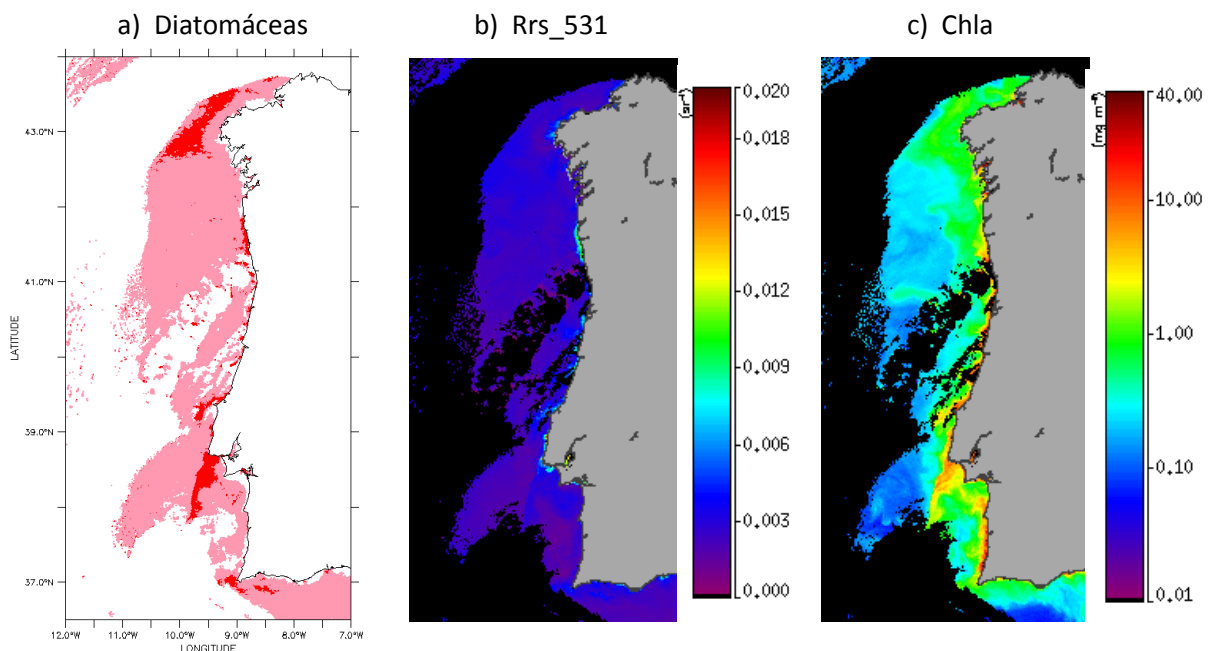


Figura 17: Resultado da identificação de diatomáceas (a) na costa portuguesa (em vermelho as diatomáceas e em rosa a população mista) em comparação as imagens de reflectância no canal de 531nm (b) e concentração de Chla (c) do sensor MODIS-Aqua do dia 14.Set.2011.

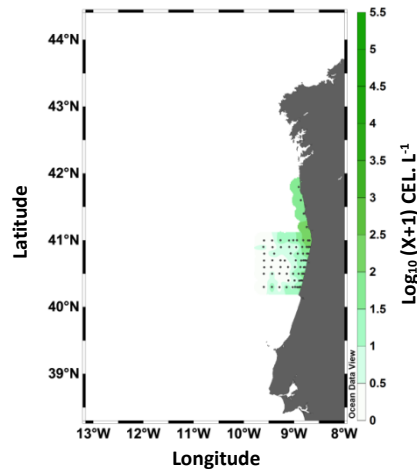


Figura 18: Resultado de contagem de células de diatomáceas para o cruzeiro de verão de 2011.

Os dados de contagem de células condizente com o período em questão confirmam a detecção de diatomáceas junto a costa na porção centro-norte de Portugal (Figura 18). Infelizmente, a contagem de células apontam para uma área de grande concentração de diatomáceas, na qual não existe dados satelitais disponíveis.

No entanto, fora do domínio dos cruzeiros utilizados, foi possível observar a detecção de uma grande mancha, supostamente diatomáceas, na região costeira e oceânica ao largo de Lisboa, que se estende em forma de filamento para o sul e *offshore*. Outra detecção bastante proeminente, porém também fora da abrangência dos dados *in situ*, pode ser observada junto ao Cabo Carvoeiro.

Ambas as detecções mencionadas a cima coincidem com uma elevada concentração de Chla, característicos da presença de diatomáceas e também são realçadas nas imagens de Rrs_531 do sensor MODIS-Aqua (Figura 17).

5.3 Metodologia PhytoDOAS

A metodologia PhytoDOAS, apesar dos bons resultados apresentados na literatura prévia, quando aplicado à escala local, demonstra pouco rigor na identificação de PFT na costa portuguesa. Na figura 19 está apresentado o resultado de identificação de diatomáceas para a média mensal de Setembro de 2010.

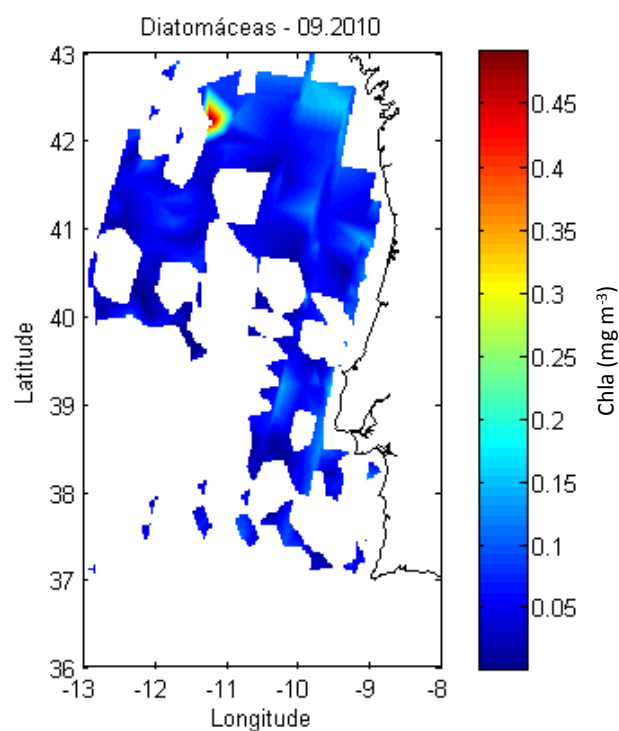


Figura 19: Resultado do método PhytoDOAS para identificação de diatomáceas na costa portuguesa, média mensal de Setembro de 2010.

A má inferência dos grupos deve-se, principalmente, a resolução espacial padrão do método, de 30 x 60 km, que quando aplicado a uma área de estudo restrita essa resolução se torna demasiado grande. Portanto, a metodologia, com a devida resolução espacial, não parece adequada para aplicação à escala local, tendo como referência os resultados dos demais algoritmos e a literatura existente no âmbito de distribuição fitoplanctônica na costa portuguesa.

6. Discussão e Conclusões

Dentre os resultados apresentados, o método PhytoDOAS, apesar de exibir a predominância de determinado grupo para algumas regiões, mostra-se deficiente na identificação dos grupos quando aplicado a escala local. Isso decorrente principalmente da resolução espacial utilizada pela metodologia.

O recurso hiperespectral associado à identificação de grupos fitoplanctônicos dominantes é de ascendente relevância visto que possui uma melhor resolução espectral que os demais sensores radiométricos. O PhytoDOAS, quando aplicado a escala global, possui ainda a capacidade de diferenciar o grupo das diatomáceas e dinoflagelados, o que, para a área de estudo seria de grande valia, visto que são espécies de dinoflagelados que estão geralmente relacionadas aos *blooms* de algas tóxicas na costa portuguesa, os quais acarretam problemas de saúde pública e prejuízos na aquicultura e turismo local.

Os resultados obtidos com a metodologia PHYSAT mostraram que a aplicabilidade desse algoritmo em *offshore*, em relação a dominância dos grupos fitoplanctônicos, condiz com o esperado para época de ressurgência na região.

De acordo com Moita (2001), fora das áreas influenciadas pelo afloramento, em águas oceânicas oligotróficas, o fitoplâncton é dominado por coccolitoforídeos, os quais segunda a classificação do método PHYSAT estão contidos na designação de nanoeucariontes. A comunidade fitoplanctônica associada às águas oligotróficas ao largo da costa portuguesa inclui *Calcidiscus leptoporus*, *Umbilicosphaera sibogae*, *Scyphosphaera apsteinii*, *Discosphaera tubifer*, *Ophiaster*, *Calciosolenia murrayi* e o dinoflagelado *Thoracosphaera heimii* (Moita, 2001), com exceção do dinoflagelado, que não é detectável pela metodologia todas as outras espécies mencionadas pertencem ao filo Haptophyta e classe Coccolithophyceae, sendo agregadas, de acordo com Alvain et al. (2008), ao grupo dos nanoeucariontes.

É notável a demarcada identificação do grupo de *Prochlorococcus* na região oceânica. Aparentemente o grupo ocupa predominantemente um nicho que tem por características águas mais quentes e oligotróficas, que corrobora o trabalho de Alvain et al. (2008, 2005), que de acordo com análise de distribuição global, afirma que os grupos de SLC e *Prochlorococcus* são dominantes em águas tropicais e oligotróficas, por serem células pertencentes ao picofitoplâncton, com elevada razão superfície-volume, são pouco sensíveis a limitação de nutrientes, sendo ainda os *Prochlorococcus* associados a valores de Chla inferior a $<0.07 \text{ mgm}^{-3}$.

No entanto, em águas costeiras mais complexas e eutrofizadas, não ocorre a identificação da dominância de grupos. Isso talvez seja decorrente do *range* de Chla utilizado (0.2 a 4.0 mg m⁻³), o que limita grande parte dos dados, visto que próximo a costa, devido ao aporte continental e à fenômenos de afloramentos costeiros comuns na área de estudo, há predominância de elevados valores de Chla, sendo estes excluídos da análise.

Estudos pretéritos apontam que condições oceanográficas de verão ao longo da costa Oeste de Portugal são influenciadas por *upwelling* costeiros dirigidos pela predominância de ventos oriundos de Norte (Oliveira et al., 2009b), promovendo condições necessárias para o crescimento de fitoplâncton (Largier et al., 2006). Estudos sobre ecossistemas costeiros de afloramento revelam que as diatomáceas são comumente o grupo dominante durante a fase de intensificação do evento de ressurgências costeiras (Oliveira et al., 2009a). Portanto era esperado uma maior detecção do grupo de diatomáceas junto a costa portuguesa, visto que esses organismos respondem rapidamente ao enriquecimento de nutrientes comumente relacionados a *upwelling*, recorrentes no período de primavera/verão na costa portuguesa.

No entanto, o método PHYSAT, desenvolvido para águas Caso 1, com parametrizações que excluem a influência de águas costeiras, como suposto, não foi capaz de fazer a discriminação de tal grupo junto a costa.

Alvain et al. (2008) alegam que o método PHYSAT apenas detecta grupos quando dominantes, isto é, quando condizem com mais de 60% da comunidade fitoplanctônica local.

Embora o grupo das diatomáceas não tenha sido discriminado ao longo da costa portuguesa, foi possível a identificação de um suposto *bloom* de diatomáceas em latitudes correspondentes as Rias Galegas. O que pode ser um indicativo de que a limitação desse algoritmo não seja o range de Chla utilizado mas sim a resolução espacial dos sensores junto a região costeira.

São escassos estudos sobre a variação sazonal da sucessão fitoplanctônica na costa galega, todavia de acordo com Tilstone et al. (1994), normalmente, no fim do período de verão, após eventos de ressurgências, ocorre mistura da coluna de água e enriquecimento da zona eufótica com nutrientes, que favorece o crescimento de diatomáceas próximo a região costeira. No entanto pequenas células de fitoplâncton, nanofitoplancton (flagelados) e picofitoplâncton (cianobactérias), são os maiores constituintes da biomassa fitoplanctônica na plataforma e em regiões de oceano aberto (Crespo et al., 2012, 2011; Tilstone et al., 2003),

sendo as diatomáceas, o grupo dominante correlacionadas a eventos de *upwelling* costeiro (Crespo et al., 2012, 2011; Espinoza-González et al., 2012).

Sob influência de ventos do quadrante sul (convergência costeira), as diatomáceas são confinadas a uma estreita faixa da costa (Castro et al., 1997) e Rias Baixas (Figueiras & Niell, 1987), mas durante o período de afloramentos (verão), água advectada das Rias podem ter uma elevada biomassa de diatomáceas sobrepondo-se a de nanofitoplâncton (Tilstone et al., 1999), podendo estas serem exportadas para *offshore*. Contudo, Álvarez-Salgado et al. (2003) defendem que a PCCC (*Portugal Coastal Counter Current*) interfere no intercâmbio de material através da borda da plataforma e tem efeito significativo na distribuição e abundância de fitoplâncton. Durante o período de afloramento costeiro ocorre o confinamento diatomáceas na plataforma, que por não terem capacidade natantes, apenas se mantêm nas camadas superiores da coluna de água em águas misturadas, em caso de águas estratificadas tendem a sedimentar, portanto a espécie encontra-se ausente na PCCC (Álvarez-Salgado et al., 2003) e pode ser encontrado em regiões oceânicas apenas sob influência de forte afloramento costeiro (Crespo et al., 2011).

De uma maneira geral o PHYSAT demonstrou eficácia na identificação dos organismos fitoplanctônicos, exibindo a distribuição geral dos grandes grupos dominantes, evidenciando a sucessão ecológica existente na predominância de *upwelling* costeiro na costa oeste da Península Iberica.

A metodologia apresentada por Sathyendranath et al. (2004), desenvolvida para águas Caso 1, apresentou resultados satisfatórios na detecção do grupo de diatomáceas junto a costa portuguesa. Especialmente, *blooms* de diatomáceas associadas a *upwelling* costeiros.

De acordo com Moita (2001) a comunidade fitoplanctônica associada a este processo é principalmente composta por diatomáceas que formam cadeias de pequena e média dimensão, como *Chaetoceros*, *Guinardia striata*, *Pseudo-nitzschia*, *Leptocylindrus danicus*, *Cylindrotheca closterium*, *Eucampia zoodiacus*, *Hemiaulus sinensis*, *Thalassiosira*, *Lauderia annulata*, *Detonula pumila* e *Thalassionema nitzschioides*. Este grupo, dominante durante o verão e primavera, estende a sua distribuição a distâncias da costa que dependem da intensidade dos afloramentos. Mas de uma maneira geral, durante o verão, ocorre a predominância de diatomáceas em águas costeiras influenciadas pelo afloramento e a sua quase ausência nas águas oceânicas estratificadas (Moita, 2001).

A figura 17 apresenta dois notáveis resultados de identificação de diatomáceas, um que se estende desde o cabo de Roca até a região oceânica ao sul de Lisboa e outro na altura do cabo Carvoeiro, no qual a detecção das diatomáceas forma uma mancha como um filamento que se distancia da costa. Ambas regiões condizentes com áreas propícias à afloramentos costeiros (Moita, 2001; Oliveira et al., 2009a; Relvas & Barton, 2005) e logo, podem ser relacionados à ocorrência de diatomáceas, no entanto, as duas referidas áreas estão fora das dimensões dos cruzeiros científicos estudados, não podendo assim ser efectuada a comprovação dos dados.

Comparativamente, a metodologia para distinção das diatomáceas acaba por complementar a lacuna apresentada no resultado do algoritmo PHYSAT, exibindo a predominância de diatomáceas junto a costa Portuguesa.

O presente trabalho confere que a diferenciação de grandes grupos fitoplanctônicos faz-se possível através da utilização de imagens de satélite e o principal objetivo alcançado com estes resultados iniciais consiste na possibilidade de aplicação de algoritmos existentes e validados para diferenciar PFT na costa oeste da Península Ibérica. No entanto alguns cuidados devem ser levados em consideração tanto na escolha do algoritmo a ser utilizado quanto nas aproximações feitas à escala local.

7. Considerações Finais

Como continuidade deste trabalho sugiro a aplicação de outros algoritmos como o proposto por Pan et al. (2010, 2013) que diferencia grupos fitoplanctônicos de acordo com a distribuição dos pigmentos acessórios característicos (biomarcadores) e exibe bons resultados para águas costeiras, principalmente quando aplicado a imagens L2 do sensor MODIS-Aqua. Seria interessante a aplicação da metodologia de Uitz et al. (2006), com a qual, através de dados obtidos em superfície é possível inferir as características ao longo da coluna de água, o que seria de grande valia quando associados os PFTs com processos de ressurgências costeiras, pois a ascensão de águas mais ricas e frias nem sempre chegam à superfície.

Apesar de localizado além dos domínios de interesse no proposto trabalho, a identificação de diatomáceas na região da Galícia é deveras interessante, principalmente se associados com às correntes, circulação local e influência das Rias Baixas.

Em relação a costa portuguesa, acredito que a morfologia da costa exerce grande influência na distribuição e condições favoráveis para ocorrência de determinados grupos fitoplanctônicos. Mesmo não tendo sido abordado com afinco no trabalho em questão ressaltaria os PFTs associados a proeminências costeiras, especificamente o Cabo Carvoeiro, Cabo da Roca, Sines e Cabo São Vicente.

Também estenderia a proposta de trabalhos à identificação dos HABs, eventuais causadores de prejuízo económico ao país. Para tal seria necessário a aplicação de algoritmos desenvolvido especialmente para identificação de dinoflagelados. E devido a melhor resolução espectral, aconselho o investimento na utilização de dados de sensores hiperespectrais, como por exemplo o sensor HICO (*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*), atualmente com dados livremente disponibilizados.

E devido à escassez de dados *in situ*, sugiro o cruzamento das informações dos resultados dos algoritmos para diferenciação dos PFTs com plataformas globais de inventários de pigmentos como NOMAD-SeaBASS e NODC-NOAA (*World Ocean Database and World Ocean Atlas Series*).

8. Referências Bibliográficas

- Aiken, J., Fishwick, J.R., Lavender, S.J., Barlow, R., Moore, G.F., Sessions, H., Bernard, S., Ras, J., Hardman-Mountford, N.J., 2007. Validation of MERIS reflectance and chlorophyll during the BENCAL cruise October 2002 : preliminary validation of new demonstration products for phytoplankton functional types and photosynthetic parameters. *Int. J. Remote Sens.* 497–516.
- Alvain, S., Hubert, L., Dessailly, D., 2012. Theoretical analysis of ocean color radiances anomalies and implications for phytoplankton groups detection in case 1 waters. *Opt. Express* 20, 1070–83.
- Alvain, S., Le Quéré, C., Bopp, L., Racault, M.-F., Beaugrand, G., Dessailly, D., Buitenhuis, E.T., 2013. Rapid climatic driven shifts of diatoms at high latitudes. *Remote Sens. Environ.* 132, 195–201.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Bréon, F.M., 2005. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 52, 1989–2004.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Hubert, L., 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochem. Cycles* 22, 1–15.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Hubert, L., Bréon, F.M., 2006. A species-dependent bio-optical model of case i waters for global ocean color processing. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 5, 917–925.
- Álvarez-Salgado, X.A., Figueiras, F.G., Pérez, F.F., Groom, S., Nogueira, E., Borges, A.V., Chou, L., Castro, C.G., Moncoiffé, G., Ríos, A.F., Miller, A.E.J., Frankignoulle, M., Savidge, G., Wollast, R., 2003. The Portugal coastal counter current off NW Spain: new insights on its biogeochemical variability. *Prog. Oceanogr.* 56, 281–321.
- Bézy, J., Delwart, S., Rast, M., 2000. MERIS – A New Generation of Ocean- Colour Sensor onboard Envisat. *ESA Bull.* 103, 48–56.
- Bovensmann, H., Burrows, J.P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V. V., 1999. SCIAMACHY : Mission Objectives and Measurement Modes. *J. Atmos. Sci.* 56, 127–150.

- Bracher, A., Vountas, M., Dinter, T., Burrows, J.P., Röttgers, R., Peeken, I., 2009. Quantitative observation of cyanobacteria and diatoms from space using PhytoDOAS on SCIAMACHY data. *Biogeosciences* 6, 751–764.
- Brewin, R.J.W., Hardman-Mountford, N.J., Hirata, T., 2011a. Detecting Phytoplankton Community Structure from Ocean Colour. *Handb. Satell. Remote Sens. Image Interpret. Appl. Mar. Living Resour. Conserv. Manag.* 125–140.
- Brewin, R.J.W., Hardman-Mountford, N.J., Lavender, S.J., Raitsos, D.E., Hirata, T., Uitz, J., Devred, E., Bricaud, A., Ciotti, A.M., Gentili, B., 2011b. An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 115, 325–339.
- Brewin, R.J.W., Hirata, T., Hardman-Mountford, N.J., Lavender, S.J., Sathyendranath, S., Barlow, R., 2012. The influence of the Indian Ocean Dipole on interannual variations in phytoplankton size structure as revealed by Earth Observation. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 77-80, 117–127.
- Brewin, R.J.W., Sathyendranath, S., Hirata, T., Lavender, S.J., Barciela, R.M., Hardman-Mountford, N.J., 2010. A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean. *Ecol. Modell.* 221, 1472–1483.
- Brotas, V., Brewin, R.J.W., Sá, C., Brito, A.C., Silva, A., Mendes, C.R., Diniz, T., Kaufmann, M., Tarran, G., Groom, S.B., Platt, T., Sathyendranath, S., 2013. Deriving phytoplankton size classes from satellite data: Validation along a trophic gradient in the eastern Atlantic Ocean. *Remote Sens. Environ.* 134, 66–77.
- Brown, C.W., Podestdt, G.P., 1997. Remote Sensing of Coccolithophore Blooms in the Western South Atlantic Ocean. *Remote Sens. Environ.* 60, 83–91.
- Campbell, J., Antoine, D., Armstrong, R., Arrigo, K., Balch, W., Barber, R., Behrenfeld, M., Bidigare, R., Bishop, J., Carr, M.-E., Esaias, W., Falkowski, P., Hoepffner, N., Iverson, R., Kiefer, D., Lohrenz, S., Marra, J., Morel, A., Ryan, J., Vedernikov, V., Waters, K., Yentsch, C., Yoder, J., 2002. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 9–1–9–15.
- Castro, C.G., Alvarez-Salgado, X. a., Figueiras, F.G., Perez, F.F., Fraga, F., 1997. Transient hydrographic and chemical conditions affecting microplankton populations in the coastal

- transition zone of the Iberian upwelling system (NW Spain) in September 1986. *J. Mar. Res.* 55, 321–352.
- Ciotti, A.M., 2008. Fundamentos e aplicações de dados bio-ópticos em oceanografia biológica. In: Souza, R.B. (org.). *Oceanografia por Satélite*. 2ed. Oficinas de textos. São Paulo, 229-244.
- Ciotti, A.M., Bricaud, A., 2006. Retrievals of a size parameter for phytoplankton and spectral light absorption by colored detrital matter from water-leaving radiances at SeaWiFS channels in a continental shelf region off Brazil. *Limnol. Oceanogr. Methods* 4, 237–253.
- Ciotti, A.M., Lewis, M.R., Cullen, J.J., 2002. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnol. Oceanogr.* 47, 404–417.
- Crespo, B.G., Espinoza-González, O., Teixeira, I.G., Castro, C.G., Figueiras, F.G., 2011. Possible mixotrophy of pigmented nanoflagellates: Microbial plankton biomass, primary production and phytoplankton growth in the NW Iberian upwelling in spring. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 94, 172–181.
- Crespo, B.G., Espinoza-González, O., Teixeira, I.G., Castro, C.G., Figueiras, F.G., 2012. Structure of the microbial plankton community in the NW Iberian margin at the end of the upwelling season. *J. Mar. Syst.* 95, 50–60.
- Cullen, J.J., Franks, P.J.S., Karl, D.M., Longhurst, A., 2002. Physical influences on marine ecosystem dynamics. In: Robinson, A.R., McCarthy, J.J., Rothschild, B.J. (Eds.), *The Sea*. John Wiley & Sons, New York, pp. 297–336.
- D’Ovidio, F., Monte, S. De, Alvain, S., Dandonneau, Y., Lévy, M., 2010. Fluid dynamical niches of phytoplankton types. *PNAS - Proceeding Natl. Acad. Sci. United State Am.* 107, 57–59.
- Demarcq, H., Reygondeau, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., 2012. Monitoring marine phytoplankton seasonality from space. *Remote Sens. Environ.* 117, 211–222.
- Devred, E., Sathyendranath, S., Stuart, V., Maass, H., Ulloa, O., Platt, T., 2006. A two-component model of phytoplankton absorption in the open ocean: Theory and applications. *J. Geophys. Res.* 111, C03011.
- Devred, E., Sathyendranath, S., Stuart, V., Platt, T., 2011. A three component classification of phytoplankton absorption spectra: Application to ocean-color data. *Remote Sens. Environ.* 115, 2255–2266.

- Dupouy, C., Benielli-Gary, D., Neveux, J., Dandonneau, Y., Westberry, T.K., 2011. An algorithm for detecting *Trichodesmium* surface blooms in the South Western Tropical Pacific. *Biogeosciences* 8, 3631–3647.
- Espinoza-González, O., Figueiras, F., Crespo, B., Teixeira, I., Castro, C., 2012. Autotrophic and heterotrophic microbial plankton biomass in the NW Iberian upwelling: seasonal assessment of metabolic balance. *Aquat. Microb. Ecol.* 67, 77–89.
- Figueiras, F.G., Niell, F.X., 1987. Composición del fitoplancton de la ría de Pontevedra (no de España)*. *Invest Pesq* 51, 371–409.
- Frank, H., 2005. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>>. Acesso em: 20.Out.2013.
- Fujiwara, a., Hirawake, T., Suzuki, K., Saitoh, S.I., 2011. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region. *Biogeosciences* 8, 3567–3580.
- Hansen, B., Bjørnsen, P.K., Hansen, P., 1994. The size ratio between planktonic predators and their prey Prey size. *Limnol. Oceanogr.* 39, 395–403.
- Hirata, T., Aiken, J., Hardman-Mountford, N.J., Smyth, T.J., Barlow, R.G., 2008. An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour. *Remote Sens. Environ.* 112, 3153–3159.
- Hirata, T., Hardman-Mountford, N.J., Brewin, R.J.W., Aiken, J., Barlow, R., Suzuki, K., Isada, T., Howell, E., Hashioka, T., Noguchi-Aita, M., Yamanaka, Y., 2011. Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types. *Biogeosciences* 8, 311–327.
- Hoepffner, N., Sathyendranath, S., 1992. Bio-optical characteristics of coastal waters : Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.* 37, 1660–1679.
- House, J.I., Colin Prentice, I., Le Quere, C., 2002. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Glob. Chang. Biol.* 8, 1047–1052.
- Hu, C., Cannizzaro, J.P., Carder, K.L., Muller-Karger, F.E., Hardy, R., 2010. Remote detection of *Trichodesmium* blooms in optically complex coastal waters: Examples with MODIS full-spectral data. *Remote Sens. Environ.* 114, 2048–2058.

- IOCCG, 2011. Bio-Optical Sensors on Argo Floats. Claustre, H. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 11, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jennings, S., Warr, K., Mackinson, S., 2002. Use of size-based production and stable isotope analyses to predict trophic transfer efficiencies and predator-prey body mass ratios in food webs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 240, 11–20.
- Kampel, M., Novo, E.M.L.M., 2008. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (org.). *Oceanografia por Satélite*. 2ed. Oficinas de textos. São Paulo. 199-228.
- Kampel, M., 2002. Sensoriamento remoto aplicado à oceanografia. In: Moraes, C.M. (org.). *Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente*. São José dos Campos: INPE. Cap.6. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.03/doc/CAP6_MKampel.pdf>. Acesso em: 10.Mar.2013.
- Kirk, J. T., 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 2ed. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 509.
- Kostadinov, T.S., Siegel, D. a., Maritorena, S., 2009. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations. *J. Geophys. Res.* 114, C09015.
- Kostadinov, T.S., Siegel, D. a., Maritorena, S., 2010. Global variability of phytoplankton functional types from space: assessment via the particle size distribution. *Biogeosciences* 7, 3239–3257.
- Largier, J.L., Lawrence, C. a., Roughan, M., Kaplan, D.M., Dever, E.P., Dorman, C.E., Kudela, R.M., Bollens, S.M., Wilkerson, F.P., Dugdale, R.C., Botsford, L.W., Garfield, N., Kuebel Cervantes, B., Koračin, D., 2006. WEST: A northern California study of the role of wind-driven transport in the productivity of coastal plankton communities. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 53, 2833–2849.
- Le Quéré, C., 2005. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Glob. Chang. Biol.* 2016–2040.
- Margalef, R., 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta* 1.
- Menezes, V.V. de, 2001. *Relação entre processos físicos e a cor do oceano atlântico tropical*. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, Brasil.

- Miller, P.I., Shutler, J.D., Moore, G.F., Groom, S.B., 2006. SeaWiFS discrimination of harmful algal bloom evolution. *Int. J. Remote Sens.* 27, 2287–2301.
- Mobley, C., 2010. Disponível em: <http://www.oceanopticsbook.info/view/overview_of_optical_oceanography/reflectances>. Acesso em: 10.Set.2013.
- Moita, M.T., 2001. Estrutura , variabilidade e dinâmica do Fitoplâncton na Costa de Portugal Continental. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Morel, A., 1997. Consequences of a *Synechococcus* bloom upon the optical properties of oceanic (case 1) waters. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1746–1754.
- Morel, A., Prieur, L., 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22, 709–722.
- Mouw, C.B., Yoder, J. a, 2010. Optical determination of phytoplankton size composition from global SeaWiFS imagery. *J. Geophys. Res.* 115, C12018.
- Nair, A., Sathyendranath, S., Platt, T., Morales, J., Stuart, V., Forget, M.-H., Devred, E., Bouman, H., 2008. Remote sensing of phytoplankton functional types. *Remote Sens. Environ.* 112, 3366–3375.
- Nelson, D.M., Tréguer, P., Brzezinski, M.A., Leynaert, A., Quéguiner, B., 1995. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochem. Cycles* 9, 359:372.
- O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Mitchell, B.G., Siegel, D.A., Carder, K.L., Garver, S.A., Kahru, M., McClain, C., 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS encompassing chlorophyll concentrations between. *J. Geophys. Res.* 103.
- Oliveira, P.B., Moita, T., Silva, A., Monteiro, I.T., Sofia Palma, A., 2009a. Summer diatom and dinoflagellate blooms in Lisbon Bay from 2002 to 2005: Pre-conditions inferred from wind and satellite data. *Prog. Oceanogr.* 83, 270–277.
- Oliveira, P.B., Nolasco, R., Dubert, J., Moita, T., Peliz, Á., 2009b. Surface temperature, chlorophyll and advection patterns during a summer upwelling event off central Portugal. *Cont. Shelf Res.* 29, 759–774.
- Organelli, E., Bricaud, A., Antoine, D., Uitz, J., 2013. Multivariate approach for the retrieval of phytoplankton size structure from measured light absorption spectra in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE site). *Appl. Opt.* 52, 2257–73.

- Pan, X., Mannino, A., Russ, M.E., Hooker, S.B., Harding, L.W., 2010. Remote sensing of phytoplankton pigment distribution in the United States northeast coast. *Remote Sens. Environ.* 114, 2403–2416.
- Pan, X., Wong, G.T.F., Ho, T.-Y., Shiah, F.-K., Liu, H., 2013. Remote sensing of picophytoplankton distribution in the northern South China Sea. *Remote Sens. Environ.* 128, 162–175.
- Polito, P.S., Sato, O.T., 2003. *Oceanografia por satélite*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil.
- Relvas, P., Barton, E.D., 2005. A separated jet and coastal counterflow during upwelling relaxation off Cape São Vicente (Iberian Peninsula). *Cont. Shelf Res.* 25, 29–49.
- Robinson, I.S., 1985. *Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. England: Ellis Horwood Ltd, pp. 455.
- Robinson, I.S., 2004. *Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography*. Springer-Praxis books in geophysical sciences. Chichester: Praxis Publishing Ltd.
- Sadeghi, a., Dinter, T., Vountas, M., Taylor, B.B., Altenburg-Soppa, M., Peeken, I., Bracher, a., 2012. Improvement to the PhytoDOAS method for identification of coccolithophores using hyper-spectral satellite data. *Ocean Sci.* 8, 1055–1070.
- Sathyendranath, S., Platt, T., 1997. Analytic model of ocean color. *Appl. Opt.* 36, 2620–9.
- Sathyendranath, S., Platt, T., 1998. Ocean-color model incorporating transspectral processes. *Appl. Opt.* 37, 2216–27.
- Sathyendranath, S., Platt, T., Cota, G., Stuart, V., 2001. Remote sensing of phytoplankton pigments : A comparison of empirical and theoretical approaches. *Int. J. Remote Sens.* 22:2-3, 249-273.
- Sathyendranath, S., Watts, L., Devred, E., Platt, T., Caverhill, C., Maass, H., 2004. Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 272, 59–68.
- Scharf, F.S., Juanes, F., Rountree, R.A., 2000. Predator size - prey size relationships of marine fish predators : interspecific variation and effects of ontogeny and body size on trophic-niche breadth 208, 229–248.

- Shen, L., Xu, H., Guo, X., 2012. Satellite remote sensing of harmful algal blooms (HABs) and a potential synthesized framework. *Sensors* 12, 7778–803.
- Shutler, J.D., Grant, M.G., Miller, P.I., Rushton, E., Anderson, K., 2010. Coccolithophore bloom detection in the north east Atlantic using SeaWiFS: Algorithm description, application and sensitivity analysis. *Remote Sens. Environ.* 114, 1008–1016.
- Silva, A., Palma, S., Oliveira, P.B., Moita, M.T., 2009. Composition and interannual variability of phytoplankton in a coastal upwelling region (Lisbon Bay, Portugal). *J. Sea Res.* 62, 238–249.
- Souza, R.B., 2008. *Oceanografia por Satélite*. 2ed. Oficinas de textos. São Paulo, pp.382.
- Souza, R.B., 2003. Sensoriamento Remoto Dos Oceanos. *Espaço Geogr.* 6, 123–145.
- Stuart, V., Sathyendranath, S., Head, E.J.H., Platt, T., Irwin, B., Maass, H., 2000. Bio-optical characteristics of diatom and prymnesiophyte populations in the Labrador Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 201, 91–106.
- Subramaniam, A., Brown, C.W., Hood, R.R., Carpenter, E.J., Capone, D.G., 2002. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery. *Deep Sea Res. Part II* 49, 107–121.
- Sunda, W., Kieber, D.J., Kiene, R.P., Huntsman, S., 2002. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae. *Nature* 418, 317–20.
- Tilstone, G., Figueiras, F., Fraga, F., 1994. Upwelling-downwelling sequences in the generation of red tides in a coastal upwelling system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 112, 241–253.
- Tilstone, G., Figueiras, F., Lorenzo, L., Arbones, B., 2003. Phytoplankton composition, photosynthesis and primary production during different hydrographic conditions at the Northwest Iberian upwelling system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 252, 89–104.
- Tilstone, G.H., Figueiras, F.G., Fermín, E.G., Arbones, B., 1999. Significance of nanophytoplankton photosynthesis and primary production in a coastal upwelling system (Ria de Vigo, NW Spain). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 183, 13–27.
- Uitz, J., Claustre, H., Morel, A., Hooker, S.B., 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *J. Geophys. Res.* 111, C08005.

Vountas, M., Dinter, T., Bracher, a., Burrows, J.P., Sierk, B., 2007. Spectral studies of ocean water with space-borne sensor SCIAMACHY using Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). *Ocean Sci.* 3, 429–440.

Anexos

Anexo 1

Tabela A: Alguns dos principais sensores da cor do oceano e a suas características. Fonte: <http://www.ioccg.org/sensors_ioccg.html>.

SENSOR	AGÊNCIA ESPACIAL	SATÉLITE	DATA OPERATIVA	SWATH (km)	RESOLUÇÃO ESPECIAL (m)	BANDAS	COBERTURA ESPECTRAL (nm)	ÓRBITA
CZCS	NASA (USA)	Nimbus-7	02.10.1978 - 22.06.1986	1556	825	6	443-12500	Polar
OCTS	NASDA (Japão)	ADEOS	17.08.1996 - 29.06.1997	1400	700	12	402-12,500	Polar
POLDER	CNES (França)	ADEOS	17.08.1996 - 29.06.1997	2400	6000	9	443-910	Polar
POLDER2	CNES (França)	ADEOS-II	14.12.2002 - 24.10.2003	2400	6000	9	443-910	Polar
*POLDER3	CNES (França)	Parasol	18.12.2004	2100	6000	9	443-1020	Polar
SeaWIFS	NASA (USA)	OrbView-2	01.08.1997 - 14.02.2011	2806	1100	8	402-885	Polar
*MODIS-Aqua	NASA (USA)	Aqua (EOS-PM1)	04.05.2002	2330	250/500/1000	36	405-14,385	Polar
*MODIS-Terra	NASA (USA)	Terra (EOS-AM1)	18.12.1999	2330	250/500/1000	36	405-14,385	Polar
MERIS	ESA (Europa)	ENVISAT	01.03.2002 - 09.05.2012	1150	300/1200	15	412-1050	Polar
*HICO	ONR e DOD (Space Test Programme)	JEM-EF (International Space Station)	18.09.2009	50 (Selected coastal scenes)	100	124	380-1000	Orbita ISS 51.6°, elevação solar >15°
*COCTS CZI	CNSA (China)	HY-1B	11.04.2007	2400 500	1100 250	10 4	402-12,500 433-695	Polar

MOS	DLR (Alemanha)	IRS-P3 (India)	21.03.1996 - 31.05.2004	200	500	18	408-1600	Polar
OCM	ISRO (India)	IRS-P4	26.05.1999 - 08.08.2010	1420	360/4000	8	402-885	Polar
*GOCI	KARI/KORDI (Coreia do sul)	COMS	26.06.2010	2500	500	124	400-865	Geoestacionário
*MERSI	CNSA (China)	FY-3A FY-3B	27.05.2008 05.11.2010	2400	250/1000	20	402-2155	Polar
*OCM-2	ISRO (India)	Oceansat-2	23.09.2009	1420	360/4000	8	400-900	Polar
*VIIRS	NOAA/NASA (USA)	NPP	28.10.2011	3000	370/740	22	402-11,800	Polar

* Sensores ainda operativos.